

## Verbundvorhaben StaMeP

### Entwicklung von standardisierten Messmethoden und Prüfständen für den Leistungsnachweis von Bauteilen solar-thermischer Kraftwerke

### Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Timo Effertz, Andreas Georg, Christoph Happich, Anna Heimsath, Christoph Hilgert, Annie Hofer, Nicole Janotte, Korbinian Kramer, Eckhard Lüpfer, Siw Meiser, Stephanie Meyen, Bijan Nouri, Johannes Pernpeintner, Werner Platzer, Björn Schiricke, Tobias Schmid, Florian Sutter

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen: 0325472A/B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Solarforschung

Linder Höhe  
51147 Köln

Tel. 02203 601 4507  
E-Mail: Nicole.Janotte@dlr.de

## Inhaltsübersicht

<b>I.</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>3</b>
I.1.	Aufgabenstellung	3
I.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4.	Stand der Wissenschaft und Technik	5
I.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
<b>II.</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>8</b>
II.1.	Ergebnisse	8
II.1.1.	AP1 – Dynamische in-situ Kollektormessung (ISE)	8
II.1.2.	AP2 – Entwicklung von Richtlinien für Abnahmetests (DLR)	16
II.1.3.	AP3 – Methodenverbesserung zur Messung des gerichteten Reflexionsgrades von Solarspiegeln (DLR+ISE)	31
II.1.4.	AP4 – Messtechnik für optische Eigenschaften von Absorberschichten (DLR+ISE)	39
II.1.5.	AP5 – Formtreuemessung an Konzentratorspiegeln (DLR+ISE)	52
II.1.6.	AP6 – Entwicklung eines Prüfstandes und standardisierten Messverfahrens zur Qualifizierung von flexiblen Rohrverbindungen (REPA) (DLR)	59
II.1.7.	AP7– Unterstützung der Normungsarbeiten durch Überführung der Ergebnisse (DLR+ISE)	65
II.2.	Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen	71
II.3.	Veröffentlichungen der Ergebnisse	71

## I. Kurzdarstellung

Mit den Aktivitäten im Verbundvorhaben StaMeP ist die Standardisierung für CSP-Komponenten durch das DLR und Fraunhofer ISE intensiv unterstützt und beschleunigt vorangetrieben worden. Es wurden ausgewählte Methoden, Prüfstände und Messeinrichtungen zum Nachweis der Qualität von Einzelkomponenten sowie der Leistungsfähigkeit von Solarfeldern in solarthermischen Kraftwerken untersucht. Mess- und Evaluierungsmethoden wurden für die wichtigsten Komponenten Spiegel, Absorber, flexible Rohrverbindungen und komplette Solarfelder analysiert, weiterentwickelt und validiert und folgende wissenschaftlichen und technischen Arbeitspakete bearbeitet:

- Entwicklung eines Prüfverfahrens für in-situ Messungen zur verlässlichen Ermittlung der optischen und thermischen Kollektorleistung mittels dynamischer Messungen
- Entwicklung von Abnahmetests zur Bestimmung/Verifizierung von technischen Parametern des Solarfeldes (insbesondere optischer Wirkungsgrad und den thermische Verluste) mit hoher Genauigkeit innerhalb eines möglichst kurzen Testzeitraums
- Entwicklung von Messgeräten zur Bestimmung des spekularen Reflexionsgrades von Spiegeloberflächen und Erweiterung der bestehenden Messrichtlinien
- Erprobung und Evaluierung von Methoden zur Messung von optischen Eigenschaften von Absorberrohren bzw. Receivern; Empfehlung für einen Mess-Standard
- Definition und Validierung der Verfahren zur Bestimmung der Formtreue von Spiegelkonstruktionen als Grundlage für einen Normungsvorschlag
- Entwicklung eines Prüfstandes zur Qualifizierung von flexiblen Rohrverbindungen (RE-PA, Rotation and Expansion Performing Assembly).
- Verbreitung der Projektergebnisse und Überführung in konkrete Vorschläge zur Standardisierung in den entsprechenden Organisationen und Gremien

Im Einzelnen wurden Mess- und Prüfstände entwickelt, der Nachweis ihrer Tauglichkeit und der Vergleich mit alternativen Methoden in Round-Robin-Versuchen geführt sowie die Parameter mit der nötigen Aussagekraft über die Qualität bestimmt. Die Ergebnisse wurden in Standardisierungsprozesse eingebracht. Dabei wurde Wert auf eine möglichst große Verbreitung, die Zusammenarbeit mit den weltweit wichtigen Standardisierungsgremien, der Industrie und anderen Forschungseinrichtungen gelegt.

### I.1. Aufgabenstellung

Für leistungsfähige solarthermische Kraftwerke sind Entwickler, Komponentenhersteller sowie Erbauer und Betreiber immer stärker auf eine objektive Vergleichbarkeit der Leistungsfähigkeit von Komponenten, aber auch auf Abnahmeprozeduren für ganze Solarfelder angewiesen. Zu Beginn des Projektes existierten noch nicht die benötigten einheitlichen Prüf- und Abnahmesstandards, um die Qualität der CSP-spezifischen Bauteile vergleichend zu beurteilen, die Leistungsfähigkeit in ein Verhältnis zu den Angebotspreisen zu setzen und damit eine nachhaltige Kostensenkung zu erreichen. Diese Lücke zu schließen führt unmittelbar zu mehr Transparenz und Konkurrenz, verbesserter Bauteilqualität und Kraftwerkseffizienz und somit kurzfristig zu geringeren Stromgestehungskosten. Weitere Innovationen werden zielgerichteter und neue Komponenten können schneller in den Markt eingeführt werden.

## I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Verbundpartner DLR Institut für Solarforschung und das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Qualifizierung konzentrierender Solartechnik. In vorausgegangenen Forschungsvorhaben wurden bereits zahlreiche Messverfahren und Prüfstände zur Bewertung von Produkteigenschaften für solarthermische Kraftwerkskomponenten erarbeitet und errichtet und stehen unter anderem im QUARZ-Zentrum des DLR und im Fraunhofer ISE „Testlab Solar Thermal Systems“ zur Verfügung. Sie werden regelmäßig von Industriepartnern für ihre Entwicklungsprojekte und zum Nachweis der Komponenteneigenschaften im Bieterverfahren für Kraftwerksprojekte angefragt und sind so weitestgehend etabliert aber nicht standardisiert. Als erster Schritt in Richtung Vergleichbarkeit der Messergebnisse von Testkapazitäten wie denen im DLR und Fraunhofer ISE dienten sogenannte Round-Robin-Tests oder Ringversuche, bei denen dieselben Prüflinge in verschiedenen Labors und Einrichtungen vermessen und charakterisiert werden. Auf Basis der Ergebnisse können Testverfahren und –stände miteinander verglichen, validiert und bewertet werden. Entsprechend bestätigte Verfahren finden Eingang in Messrichtlinien und Vorschläge zur Standardisierung und letztendlich Normen. Dieses Vorgehen ist arbeits-, zeit- und kostenintensiv und wird von der Industrie in der Regel zwar stark befürwortet aber kaum finanziell unterstützt. Mit Hilfe von StaMeP konnten Ringversuche für Reflexionsgrad, Spiegelformtreue und Absorptionsgrad systematisch durchgeführt und ausgewertet werden.

Gleichzeitig entwickeln sich aus der internationalen Zusammenarbeit und Industrieaufträgen kontinuierlich neue Fragestellungen. Im Hinblick auf deren Klärung fehlende Testkapazitäten konnten zum Teil im Vorhaben ergänzend errichtet werden und werden für zukünftige Arbeiten zur Verfügung stehen.

Während der Laufzeit hat sich die allgemeine Situation des CSP-Markts insbesondere in Spanien und den USA in Folge der Finanz- und Wirtschaftskrise und politischen Richtungswechseln nicht kontinuierlich entwickelt. Stark gekürzte Einspeisevergütungen und mangelnde Rechtssicherheit sowie vermeintliche Vorteile der Photovoltaik ließen Investitionen in neue Kraftwerksprojekte dort stark zurückgehen und schwächten die Branche insgesamt aber auch die deutschen Komponenten- und Technologielieferanten und Projektentwickler. Auch deutsche Unternehmen sind davon betroffen und haben auf unterschiedliche Weise darauf reagieren können. In den USA sind die Forschungsaktivitäten stark reduziert worden und beschränkten sich hauptsächlich auf Solarturmkraftwerke. Aus diesem Grund gab es im Projekt weniger Austausch mit US-amerikanischen Forschern und Forschungseinrichtungen als ursprünglich geplant.

## I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in sechs Hauptarbeitsfelder (AP1-6) in denen jeweils spezifische Messmethoden und Prüfstände (weiter)entwickelt wurden und die übergeordnete Einbringung der Arbeitsergebnisse in die internationale Normierung (AP7).

Es hatte ursprünglich eine Laufzeit von 3 Jahren und begann zum 1.Juni 2012. Abweichungen vom ursprünglichen Zeitplan entstanden unter anderem durch:

- Verzögerung des Beginns des Vorhabens
- starke Mittelverschiebung zu späteren Zeitpunkten
- verzögerter Zugang zu Kraftwerksanlagen
- Umzug des ISE Labors
- Wegfall einer Infrastrukturmaßnahme des DLR am Standort Jülich

Dies führte zu Verschiebungen, organisatorischem Aufwand und leichten inhaltlichen Anpassungen innerhalb des Vorhabens. Die Arbeiten zur Prüfung von flexiblen Rohrverbindungen (REPA) mussten aufgrund geänderter Randbedingungen aufwändig als alternatives Konzept erarbeitet werden. Ein eigenständiger REPA-Teststand wurde schließlich am Standort PSA ermöglicht. Das zeitlich verlängerte Projekt wurde im vorgesehenen Budget Ende Februar 2016 abgeschlossen.

#### I.4. Stand der Wissenschaft und Technik

Mit der Marktförderung von kommerziellen CSP-Kraftwerksprojekten in großem Maßstab sind in den letzten Jahren zahlreiche neue Hersteller von Komponenten solarthermischer Kraftwerke in den Markt eingetreten. Diese Konkurrenzsituation und die angestrebte Kostensenkung von Strom aus solarthermischen Kraftwerken erfordern unabhängige und objektive Prüfverfahren, die den Vergleich und die Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit ermöglichen. Grundlegende Verfahren sind im Rahmen der Vorläufer-Projekte OPAL, SAPHIR, QUARZ-CSP, FRESQUALI und OPTINEL bei DLR und FhG entwickelt und getestet worden. Das Verbundvorhaben StaMeP basiert auf einigen dieser Vorarbeiten. Der konkrete Stand der Technik der relevanten Messmethoden und –verfahren ist im Folgenden nach Messaufgaben zusammengefasst:

- Die thermische Leistungsfähigkeit von Parabolrinnenkollektoren und -feldern ist entscheidend für den Ertrag und somit die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke. Thermische Leistungsmessungen zur Qualifizierung einzelner Kollektormodule werden in der Regel auf drehbaren Prüfständen oder in speziellen Anlagen in Testzentren bei quasi-stationärer Betriebsweise über die Bilanzierung eingestrahelter und nutzbarer Leistungen durchgeführt. Abnahmetests zur Messung und Bewertung der Leistungsfähigkeit des Solarfelds werden bisher individuell zwischen den Projektparteien eines Solarkraftwerks vereinbart und sind langwierig. Dies birgt Unklarheiten und Risiken.  
Durch eine Standardisierung der Verfahren wird die Leistungsmessungen vor Ort vereinfacht und gleichzeitig werden kommerzielle und technische Risiken minimiert. Hierzu notwendige Verfahren zur dynamischen Vermessung und Auswertung größerer Einheiten (Kollektoren, Loops, Felder) vor Ort sind von den Projektpartnern vorbereitet, bedürfen aber noch der weiteren Validierung und Veröffentlichung. Dies gilt ebenfalls für die Identifikation von thermischen Leistungsparametern und Abnahmeprozeduren sowie den Einsatz eines unabhängigen, mobilen Feldlabors zur unabhängigen Überprüfung der Produktionsleistung (Abnahmetest).
- Geräte zur Messung des **gerichteten Reflexionsgrads** von Oberflächen sind prinzipiell kommerziell erhältlich und werden für den Glanzgrad von Verpackungen oder Straßenmarkierungen eingesetzt. Die spezifischen Anforderungen zur Qualifizierung **von Solarspiegeln** für konzentrierende Systeme (Wellenlängenbereich, definierter Akzeptanzwinkel und Reproduzierbarkeit für verschiedene Spiegeltypen) sind dabei jedoch nicht erfüllt, so dass existierende Geräte nicht für die gängigen Spiegelmaterialien gleichermaßen anwendbar sind. Dies behindert den Fortschritt der Standardisierung der Messverfahren und Kenngrößen. Geräte zur Verschmutzungsmessung aus anderen Industriezweigen (z.B. Automobilindustrie) können nicht für Solarspiegel angewendet werden. Speziell dafür geeignete Instrumente für den Außeneinsatz sind kommerziell nicht erhältlich.
- Die **spektralen optischen Eigenschaften von Absorberschichten** werden bisher nur auf ebenen Proben ermittelt. Die Messung auf gekrümmten Oberflächen der solaren Absorber ist nicht Stand der Technik. Spektrometrisch können der Absorptionsgrad des Absorbers und der Transmissionsgrad des Glashüllrohres von Parabolrinnenreceivern



bisher lediglich an den Einzelteilen gemessen werden, dazu müssen die zu untersuchenden Receiver zerstört werden.

- Von entscheidendem Einfluss auf die **thermischen Eigenschaften von Absorberschichten** eines Parabolrinnenreceivers ist der gesamthemisphärische Emissionsgrad der Absorberschicht. Die Messung der thermischen Eigenschaften von vollständigen Receivern über eine elektrische Heizung auf Betriebstemperatur ist heute Stand der Technik. Indirekt kann von derartigen Messungen auch auf den gesamthemisphärischen Emissionsgrad der Absorberschicht zurückgeschlossen werden. Eine direkte Messung des gesamthemisphärischen Emissionsgrads der Absorberschicht ist in der Receiver-Entwicklung als Zwischenschritt unabdingbar. Vorher wurde diese Messung meist über den Umweg der direkt-hemisphärischen Reflexion der kalten und flachen Probe durchgeführt.
- Streifenreflexionsverfahren (Deflektometrie) werden sowohl in Testlabors als auch vielfach in der industriellen Spiegelfertigung zur **Formtreuemessung an Konzentratorspiegeln** angewendet. Es gibt bisher allerdings keine harmonisierte Definition von Testbedingungen und -verfahren im Sinne einer Standardisierung der Methode.
- Die **Qualifizierung flexibler Rohrverbindungen** erfolgt in der Regel im Praxistest durch Einbau in bestehende Parabolrinnenanlagen. Damit ergeben sich die Testbedingungen aus dem Betrieb der Anlage, insbesondere eine Beschleunigung der Alterung ist somit schwer möglich. Es existieren keine Testverfahren mit gesicherter Aussagekraft in Hinblick auf die Lebensdauer dieser Komponenten unter realen Betriebsbedingungen. Ein bei einem Hersteller bestehender Teststand für flexible Rohrverbindungen ist weder für alternative Anbieter noch zur Erprobung von Testverfahren zugänglich.

## I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Sinne der Standardisierung der im Projekt (weiter)entwickelten Mess- und Prüfmethoden für den Leistungsnachweis von Bauteilen solarthermischer Kraftwerke wurde auf der Ebene der Projektmitarbeiter ein enger fachlicher Austausch und eine inhaltliche Vernetzung mit den folgenden parallelen Forschungsvorhaben gepflegt:

- **SolarPACES guiSmo** Aktivitäten  
*Guidelines for CSP performance modeling*
- **SolarPACES Reflectance Working Group, Aktivitäten und internationaler Workshop**  
*Guidelines for Reflectance measurements*
- **CSPBankability** (BMW, 01/2014-12/2016)  
*Verbesserte Bankability solarthermischer Kraftwerksanlagen durch standardisierte Ertragsberechnungsverfahren*
- **INS1226 Performance** (INS 03/2014 – 12/2015)  
*Standardisierung von Performancemessungen an solarthermischen Kollektorfeldern im Kraftwerksbereich*
- **SFERA-II** (EU FP7, 01/2014-12/2017)  
*Solar Facilities for the European Research Area - Second Phase*
- **STAGE STE** (EU FP7, 02/2014 - 01/2018)  
*Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy*

Arbeitsergebnisse aus dem Projekt und teilweise von Vorarbeiten wurden in die entsprechenden Strukturen in der internationalen Normungsarbeit im DIN K374 Spiegelkomitee, in IEC TC 117 „Solar Thermal Power“ sowie Arbeitsgruppen von Aenor und SolarPACES Task I und Task III eingebracht.

Im Laufe des Projektes wurde der spanische Partner Ciemat für die Zusammenarbeit an den Tests für flexible Rohrverbindungen gewonnen. Die Kooperation basiert auf gemeinsamen Interessen auf dem Gebiet der Lebensdauerprüfung von flexiblen Rohrverbindungen für solarthermische Kraftwerke der Projekte StaMeP und SFERA-II und ermöglichte letztlich den Aufbau und die gemeinsame Nutzung eines entsprechenden Prüfstandes.

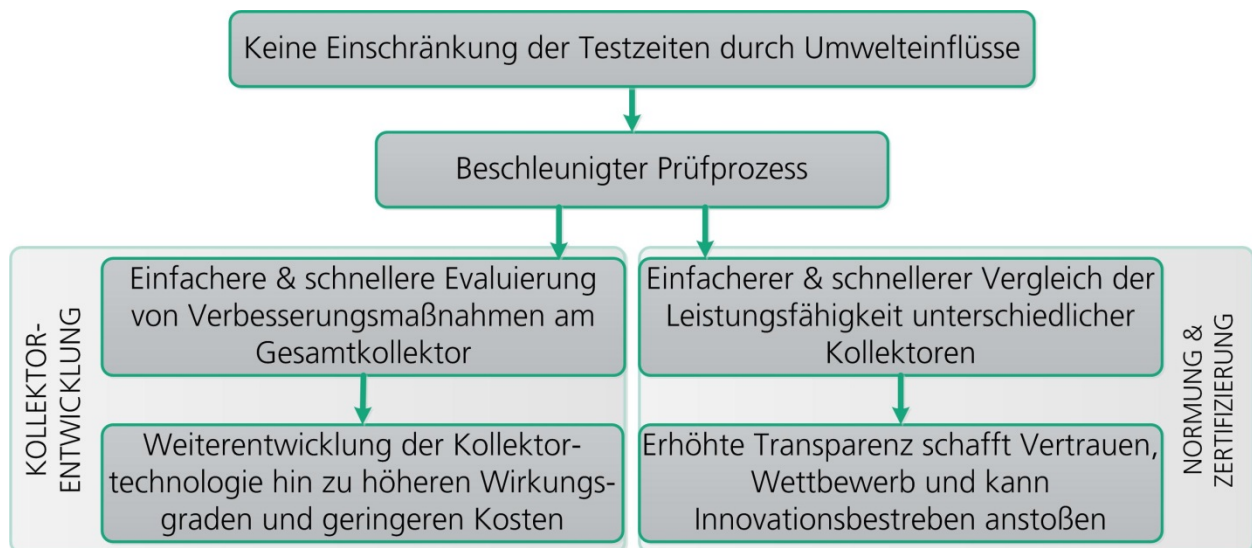
In die Best-Practice Guideline zur in-situ Vermessung von konzentrierenden Kollektoren und Abnahme von Solarfeldern flossen Erfahrungen aus dem TestLab Solar Thermal Systems Kollektor-Prüflabor des Fraunhofer ISE und dem DLR Test- und Qualifizierungszentrum für konzentrierenden Solartechnik (QUARZ Zentrum) ein.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1. Ergebnisse

#### II.1.1. AP1 – Dynamische in-situ Kollektormessung (ISE)

Aufgrund der Größe von konzentrierenden Kraftwerks- oder Prozesswärmekollektoren ist eine Charakterisierung der Leistungsfähigkeit in Labortest nur schwer möglich. Als Konsequenz daraus werden konzentrierende Kollektoren in der Regel als größere Kollektorstränge in Outdoor-Tests vermessen. Meist erfolgt eine Installation an Standorten des Herstellers oder des Endkunden, bei denen selten Rückkühl- oder Aufheizereinheiten zugänglich sind, um stationäre oder quasi-dynamische Prozessbedingungen (wie konstante Fluidtemperaturen und Massenstrom) einstellen zu können. Zudem erfordert auch das starke Schwanken der Umgebungsbedingungen in Freilufttest (wie Solareinstrahlung, Umgebungstemperatur oder Windbedingungen) ein dynamisches Messverfahren und eine dynamische Auswertungsmethodik. Die mit einem dynamischen Prüfverfahren einhergehenden Vorteile sind in Abbildung 1 zusammengefasst.



**Abbildung 1:** Vorteile eines dynamischen Prüfverfahrens für konzentrierende Solarkollektoren

Mit Abschluss des Projektes wurden vom Fraunhofer ISE Methoden zur in-situ Prüfung sowohl für Parabolrinnenkollektoren als auch für lineare Fresnel Kollektoren entwickelt. Dabei wurden zwei Ansätze parallel verfolgt: einerseits wurde ein Testverfahren in Anlehnung an die momentan gültige Norm entwickelt, mit minimal notwendigen Anpassungen, um eine allgemeine Auswertung von konzentrierenden Kollektoren zu ermöglichen. Andererseits wurde auch ein alternatives, voll-dynamisches Messverfahren erarbeitet, welches in der Praxis angewandt und verbessert wurde. Dieses Testverfahren bringt den Vorteil von höherer Flexibilität der Messsequenzen mit sich (siehe Abbildung 1).

Grundstein hierfür bildete eine gründliche Literaturrecherche zu verfügbaren Prüfverfahren (AP 1.1), mit einer Gegenüberstellung von deren Potentiale, Herausforderungen und eventuellen Einschränkungen. Für eine verlässliche Kollektorprüfung ist nicht nur eine geeignete Prüf- bzw. Auswertungsmethodik essentiell, sondern auch das korrekte Erfassen der Messdaten. Dabei spielt die Auswahl an passender Messtechnik eine erhebliche Rolle. Anhand von Untersuchungen zur Messunsicherheit konnten geeignete Messinstrumente identifiziert werden, welche in



einer mobilen Messstation zur in-situ Messung von konzentrierenden Kollektoren integriert wurden (AP 1.2). Abschließend konnten Messtechnik sowie Methodik in der Praxis anhand von Kollektormessungen erfolgreich getestet werden (AP 1.3).

Die relevanten Ergebnisse des Arbeitspaketes 1 im Hinblick auf eine standardisierte Prüfung von konzentrierenden Kollektoren wurden in einer Best-Practice-Guideline „Dynamic in situ Performance and Acceptance Testing of Line-Concentrating Collectors and Solar Fields“ zusammengefasst und mit wesentlichen Inhalten des Arbeitspaketes 2 zusammengeführt. Inhalte der Best-Practice-Guideline wurden auf der SolarPACES Konferenz 2015 in Kapstadt im Task I-Meeting vorgestellt. Nach einem Review-Verfahren unter internationalen Experten wird eine Veröffentlichung im Rahmen des SolarPACES-Task I angestrebt.

#### **II.1.1.1. AP1.1 – Analyse von Verfahren zur in-situ Kollektormessung**

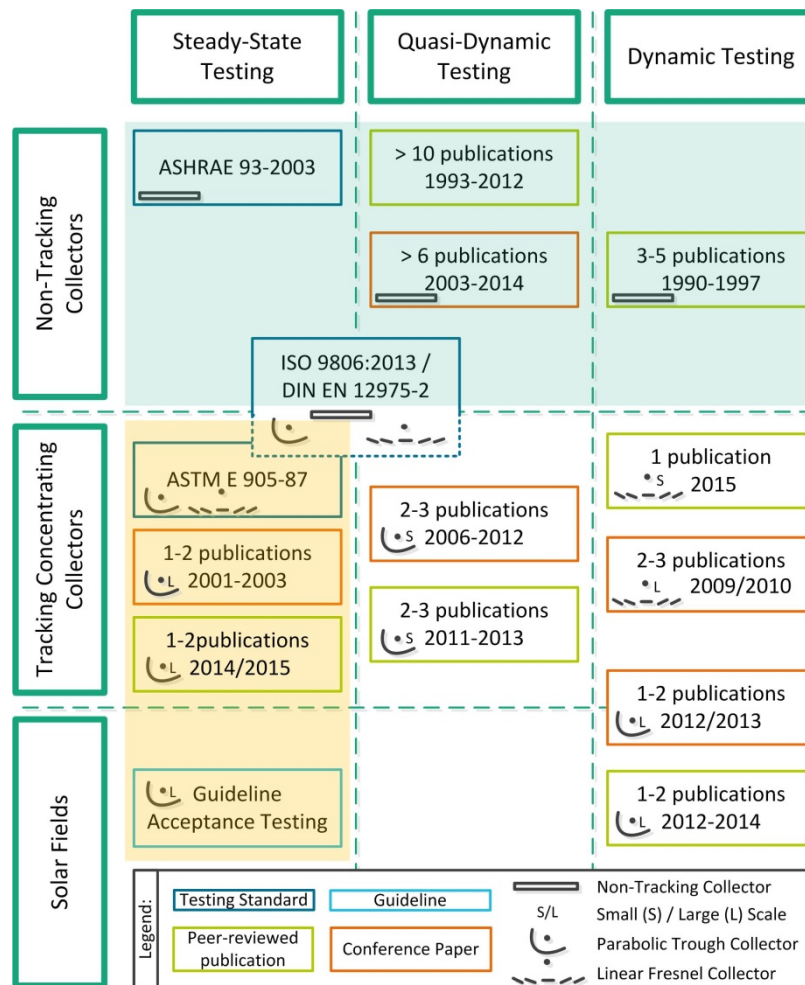
Im Rahmen des Projektes erfolgte eine ausführliche Literaturrecherche zum Stand der Technik von Prüfverfahren für linien-konzentrierende Solarkollektoren. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht an veröffentlichter Literatur im Bereich von bereits implementierter Prüf- sowie Auswertungsverfahren von solarthermischen Kollektoren. Dabei wird ersichtlich, dass mehrere Prüfnormen und eine Vielzahl an Veröffentlichungen im Bereich der nicht-konzentrierenden Niedertemperatur-Kollektoren existieren (grün hinterlegter Bereich). Im Bereich konzentrierender Kollektoren existieren bereits eine Norm und eine Guideline anhand von stationären Messungen (orange hinterlegter Bereich). Allerdings sind diese bereits vorhandenen Normen nur eingeschränkt für konzentrierende Kollektoren anwendbar, was sich auch an der geringen Anzahl an Veröffentlichungen in diesem Bereich widerspiegelt. Stationäre Messungen sind in Outdoor-Tests nur äußerst schwierig und mit komplexer sowie kostspieligem Mess- und Prozess-equipment realisierbar. Die quasi-dynamische Testmethode ist für lineare Fresnel Kollektoren aufgrund deren optischer Besonderheiten (zwei-dimensionaler IAM) nicht unmittelbar anwendbar. Daher wurden im Rahmen des Projektes am Fraunhofer ISE zwei Schwerpunkte weiter verfolgt: zum einen wurde die momentan gültige Norm ISO 9806:2013 so erweitert, dass sie auch auf lineare Fresnel Kollektoren angewendet werden kann. Darüber hinaus erfolgte die Weiterentwicklung einer dynamischen Auswertungsmethode als alternativer Ansatz mit größerem Freiheitsgrad und folglich großem Potential zu Vereinfachung und Beschleunigung der Testzeiten. Dieser Aspekt zeigt sich im Speziellen für konzentrierende Kollektoren als relevant sowie bei in-situ Messungen im Allgemeinen.

Die spärliche Verfügbarkeit von Veröffentlichungen im Bereich dynamischer Testverfahren spiegelt sich auch im Forschungsalltag von Industrie und Forschungsinstituten wider. Anhand einer Umfrage im Rahmen des EU-Projektes Stage-STE zu momentan verwendeten Test- und Auswertungsverfahren im Bereich linien-konzentrierender Solarkollektoren konnte gezeigt werden, dass auch nicht-veröffentlichte Testverfahren meist auf quasi-dynamischen Messungen basieren.<sup>1</sup> Dynamische Auswertungsmethoden und ihre umfassende Prüfung, Validierung und Erweiterungen wurden bisher selten bearbeitet. Umso wichtiger war es, genau diesen Aspekt in Praxis und Theorie im Rahmen des Projektes zu beleuchten und Erkenntnisse und Anwendungstipps im Rahmen der erarbeiteten Guideline zur Verfügung zu stellen. Somit konnte ein

---

<sup>1</sup> A. Hofer, L. Valenzuela, N. Janotte, J.I. Burgaleta, J. Arraiza, M. Montecchi, F. Sallaberry, T. Osório, M.J. Carvalho, F. Alberti, K. Kramer, A. Heimsath, W. Platzer, S. Scholl (2015): State of the Art of Performance Evaluation Methods for Concentrating Solar Collectors. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES Cape Town, 2015.

standardisiertes, praktikables und aussagekräftiges Testverfahren für konzentrierende Kollektoren erarbeitet werden.



**Abbildung 2:** Übersicht Veröffentlichungen im Bereich von Prüfverfahren (nicht-)konzentrierender Solarkollektoren<sup>2</sup>

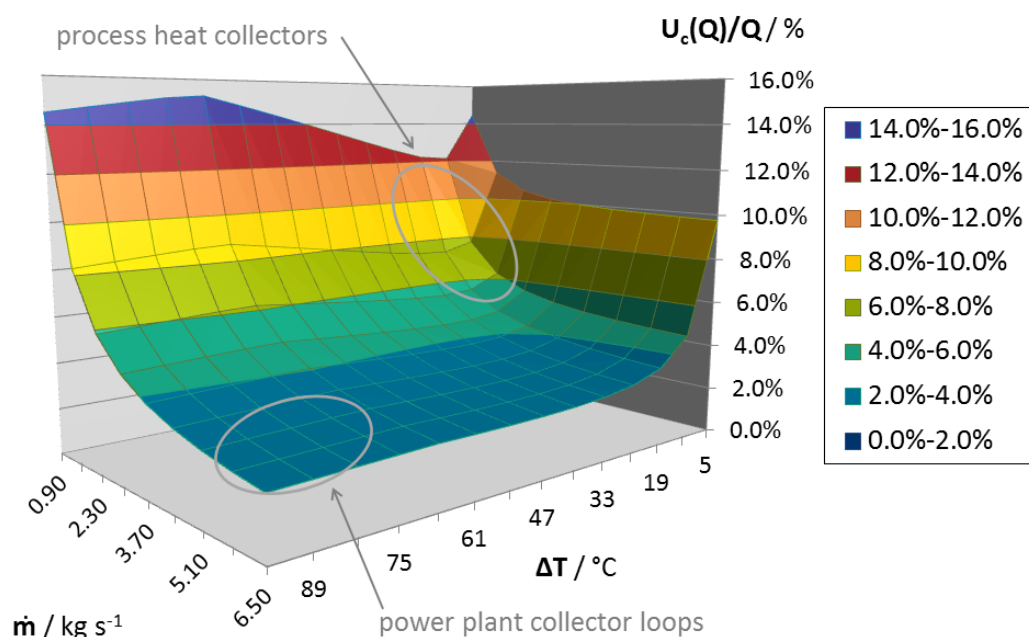
### II.1.1.2. AP1.2 – Unabhängige in-situ Kollektorqualifizierung

Ein aussagekräftiges Prüfverfahren setzt nicht nur eine adäquate Auswertungsverfahren voraus, sondern auch eine korrekte und verlässliche Messung des Kollektorzustandes, um die Kollektorleistungsfähigkeit repräsentativ bestimmen zu können.

Daher wurden im Rahmen des Projektes vom Fraunhofer ISE Anforderungen und Empfehlungen für die Messsensorik, Datenerfassung und Datenübertragung zur in-situ Prüfung von fluidführenden Kollektoren detailliert erarbeitet. Die Untersuchungen beinhalten vor allem auch eine Gegenüberstellung von invasiver (im Hydraulikkreislauf eingreifender) Messsensorik zu nicht-invasiver (extern angebrachter, sog. clamp-on) Messsensorik. Messunsicherheiten und deren

<sup>2</sup> A. Hofer, L. Valenzuela, N. Janotte, J.I. Burgaleta, J. Arraiza, M. Montecchi, F. Sallaberry, T. Osório, M.J. Carvalho, F. Alberti, K. Kramer, A. Heimsath, W. Platzer, S. Scholl (2015): State of the Art of Performance Evaluation Methods for Concentrating Solar Collectors. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES Cape Town, 2015.

Auswirkungen auf die Auswertungsergebnisse wurden bei der Empfehlung der Sensorik berücksichtigt. Bei der Auswahl sind vor allem kleinere Prozesswärmekollektoren im Gegensatz zu großen Kraftwerkskollektoren zu unterscheiden, da die Auswirkung der Unsicherheit der Messtechnik stark von den jeweiligen Betriebszuständen des Kollektors abhängt (siehe Abbildung 3). Wohingegen clamp-on Messtechnik für große Kraftwerkskollektoren mit akzeptablen Messunsicherheiten einher geht (in Abbildung 3 ca. 2%), können mit ihrem Einsatz für kleinere Prozesskollektoren keine hinreichend kleinen Fehlerbänder erreicht werden (ca. 6-8%).<sup>3</sup> Diese großen Unsicherheiten der clamp-on Messtechnik bei Prozesswärmekollektoren lassen zum momentanen Stand der Technik keine verlässliche Auswertung der Kollektorleistungsfähigkeit auf Basis von clamp-on Messungen zu.



**Abbildung 3:** Theoretische Unsicherheitsanalyse externer Clamp-on Messtechnik in Abhängigkeit des Massenstroms und der Fluidtemperatur<sup>3</sup>

Aufgrund dessen wurde für den Aufbau einer mobilen Messeinheit zur Erfassung aller relevanten Prozessparameter auf eingreifende, aber dennoch mobile sowie vorkalibrierte Messtechnik zurückgegriffen. Diese lässt auch in kleineren Leistungsbereichen von konzentrierenden Kollektoren eine möglichst genaue Auswertung der Kollektorleistungsfähigkeit zu.

Eine erste Version eines solchen mobilen Teststands wurde mit den Mitteln des Projekts unterstützt und am Fraunhofer ISE aufgebaut (siehe dazu Abbildung 4 und Abbildung 5). Dabei sind insbesondere die Randbedingungen einer „in-situ“-Messsituation berücksichtigt, unter anderem eine Datenfernübertragung mit Selbststartautomatik. Das mobile Messsystem wurde mittels eines VPN Remote Access Gateways aufgebaut, das jederzeit den Fernzugriff via GSM/GPRS Modem ermöglicht. Alle notwendigen Prozesse werden über Autostart-Skripte neu initiiert, sollten sie, z.B. durch Stromausfall, unterbrochen werden.

Anschließend erfolgte die Tauglichkeitsprüfung des ausgewählten Messequipments an einem Testkollektor zur Erzeugung von Prozesswärme. Die Messeinheit konnte im Rahmen einer ers-

<sup>3</sup> A. Hofer, S. Perry, S. Fahr, K. Kramer, A. Heimsath, S. Scholl, W.J. Platzer (2016): Improved Performance Testing of Line-Concentrating Solar Collectors: Comprehensive Uncertainty Analysis for the Selection of Measurement Instrumentation. To be published in Applied Energy.

ten Mess-Kampagne am Standort Freiburg zur Probe eingesetzt werden und hat sich als sehr verlässlich bewiesen. Die verwendeten Komponenten/Sensoren und die Methoden zur Fehlerbehebung (Kalibrierung) zeigten sich äußerst zuverlässig. In weiteren Forschungsprojekten soll diese Möglichkeit weiter entwickelt werden.

Wesentliche Inhalte der Messunsicherheitsberechnungen, allgemeine Empfehlungen zur Sensorik und ein Leitfaden zur Auswahl von adäquater Messtechnik wurden in die Best-Practice-Guideline überführt. Dabei wurden grundlegenden Vor- und Nachteile invasiver und non-invasiver Messinstrumente zusammengestellt sowie die Auswirkung einer Verwendung von bereits in Kollektorsystemen integrierter Standard-Messtechnik erläutert. Damit konnte eine gute Übersicht wichtiger Praxispunkte für zukünftige Kollektorprüfungen geschaffen werden.



**Abbildung 4:** Schaltschrank zur mobilen Fernübertragung von Messdaten mit ausreichend hoher Genauigkeit, Zeitintervallen und Restart-Automatik



**Abbildung 5:** Blick in den Container des Fraunhofer ISE, der die hydraulischen Bauteile enthält, um den Messkreis für Insitu-Messungen zu betreiben.

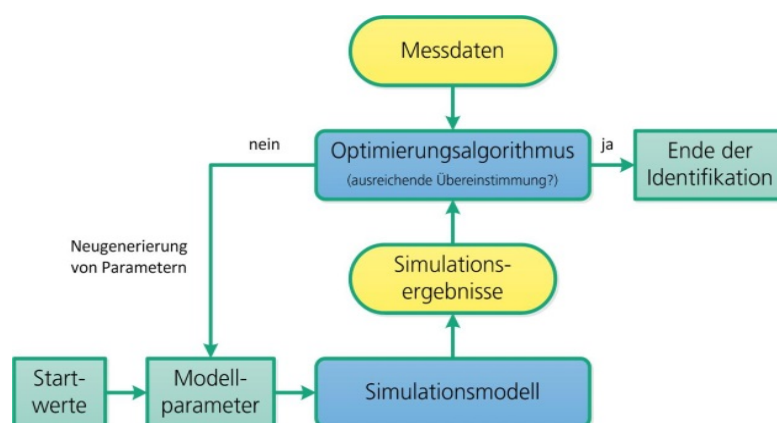


### II.1.1.3. AP1.3 – Bestimmung von Kollektorkenngrößen

Nach identifiziertem Stand der Technik in AP 1.1 und ausgewählter sowie aufgebauter mobiler Messeinheit in AP 1.2, wurden innerhalb AP 1.3 die Erweiterung und Anwendung einer verlässlichen Auswertungsmethodik bearbeitet, um am Ende des Projektes zu AP1 eine allgemeingültige, standardisierte, umfassende Prüfmethodik von linien-konzentrierenden Kollektoren vorlegen zu können.

Einerseits wurde die bereits gültige Norm DIN EN ISO 9806:2013 erweitert, um auch lineare Fresnel Kollektoren auswerten zu können. Die Erweiterung steht im Zusammenhang mit dem zwei-dimensionalen Einfallswinkelkorrekturfaktor (IAM) dieser Kollektorart und kann daher auf alle Kollektoren, die diese Eigenschaft besitzen, angewendet werden. Der in der Norm vorgeschlagene multiple lineare Regressions-Ansatz lässt sich nur auf die Bestimmung eines ein-dimensionalen IAM anwenden. Hier wurde ein iteratives MLR-Verfahren entwickelt, um den Grundlagen der Norm gerecht zu werden und nur geringst-nötige Anpassungen zu vollziehen. Dieser Ansatz erwies sich anhand von diversen Messdatenauswertungen in der Praxis als zielführend und äußerst zuverlässig.<sup>4</sup> Weitere Arbeiten in zukünftigen Projekten sind jedoch für eine weiterführende Verallgemeinerung der Methode notwendig.

Darüber hinaus konnten im Rahmen des Projektes am Fraunhofer ISE die vorhandenen Vorarbeiten weiterentwickelt werden, hin zu einer umfassenden, alternative Auswertungsmethodik auf Basis von dynamischen Messungen. Die Auswertung dynamischer Messdaten zur Bestimmung von Kollektorkenngrößen erfolgt mittels der Methode der dynamischen Parameteridentifikation, bei der Messdaten mit simulierten Kollektordaten anhand eines Optimierungsalgorithmus verglichen und iterativ angepasst werden, bis die Abweichungen ein Minimum erreichen (siehe Abbildung 6). Dabei stellt das Simulationsmodell eine wichtige Komponente dar, mit Hilfe dessen das Kollektorverhalten dynamisch abgebildet wird. Grundbaustein ist hierbei ein empirisches, d.h. parametrisiertes Kollektormodell. Untersuchungen zum Verhalten der thermischen Verluste von Linearen Fresnel Kollektoren in Abhängigkeit der Betriebstemperaturen zeigten, welche Faktoren, wie z.B. Windgeschwindigkeit, Umgebungstemperatur und Solareinstrahlung, die thermische Verlustleistung von verschiedenen Kollektoren im relevanten Maßstab beeinflussen.



**Abbildung 6:** Verfahrensskizze der dynamischen Parameteridentifikation<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Hofer, A.; Büchner, D.; Heimsath, A.; Fahr, S.; Kramer, K.; Platzer, W.; Scholl, S. (2015): Comparison of Two Different (Quasi-) Dynamic Testing Methods for the Performance Evaluation of a Linear Fresnel Process Heat Collector. In: Energy Procedia (69), S. 84–95.

Die erweiterte Auswertungsmethodik lässt nun eine verbesserte und flexiblere Messdatenauswertung zu und ermöglicht somit auch Werte des Einfallwinkelkorrekturfaktors parallel zur optischen Effizienz zu bestimmen. Für einen Prozesswärmekollektor mit Druckwasser konnte die erweiterte dynamische Auswertungsmethodik angewandt werden. Ein Vergleich dieser Methode mit der normativ vorgeschriebenen quasi-dynamischen lieferte eine gute Übereinstimmung bei der Methoden. Beide Methoden lieferten ähnliche Ergebnisse bezüglich des Konversionsfaktors (optische Effizienz) und der IAM-Verläufe. Der Vergleich bestätigte das Potential beider Methoden und bildete einen guten Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung der alternativen dynamischen Auswertemethode gegenüber den gegenwärtigen normativen Testverfahren. Dies ist besonders für die in-situ-Vermessung von großen konzentrierenden Kollektoren von Bedeutung. Hauptvorteil der dynamischen Auswertungsmethodik liegt in der deutlich flexibleren Messdatenbasis, da Prozessparameter wie Einlasstemperatur und Massenstrom nicht konstant gehalten werden müssen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Messdatenbasis der quasi-dynamischen Methode im Vergleich zur dynamischen Auswertungsmethode.

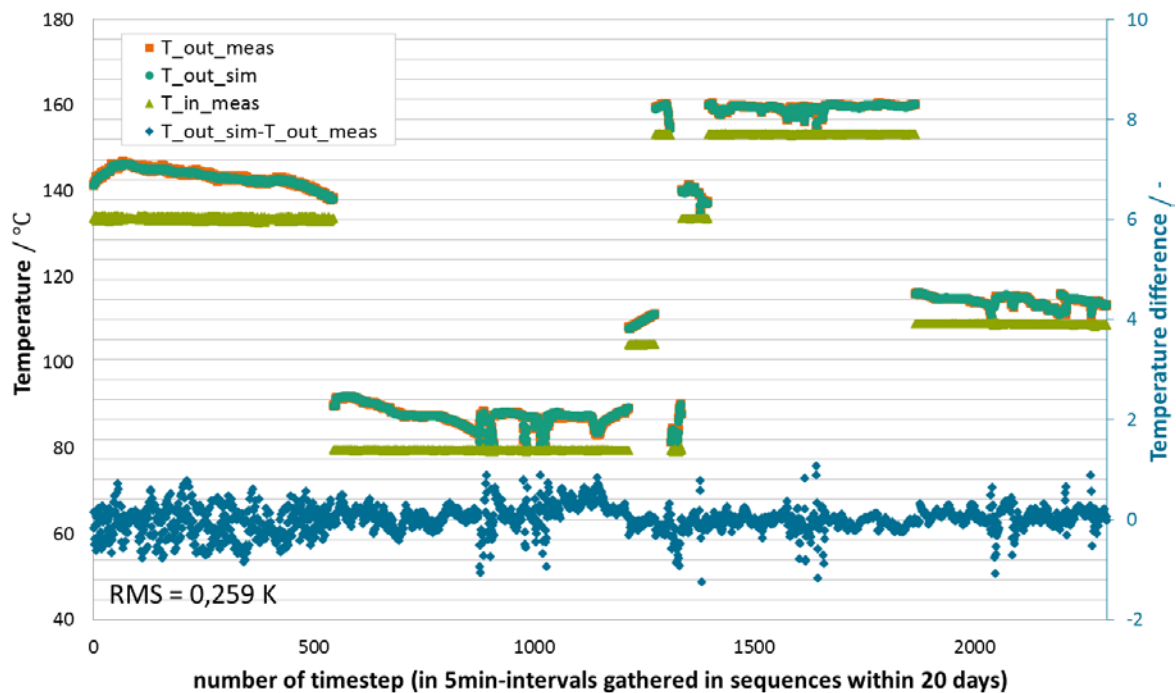
Es wird ersichtlich, dass mit der am Fraunhofer ISE entwickelten dynamischen Methode auch Messdaten mit erheblichen Temperaturschwankungen ausgewertet werden können und somit die Methode ein Potential zur Reduktion des Messzeitraumes birgt<sup>5</sup>. Damit wird es mit der erweiterten Methodik möglich sein, konzentrierende Kollektoren unterschiedlicher Technologien und Ausführungen auf einer wissenschaftlich fundierten Basis dynamisch auswerten zu können.

---

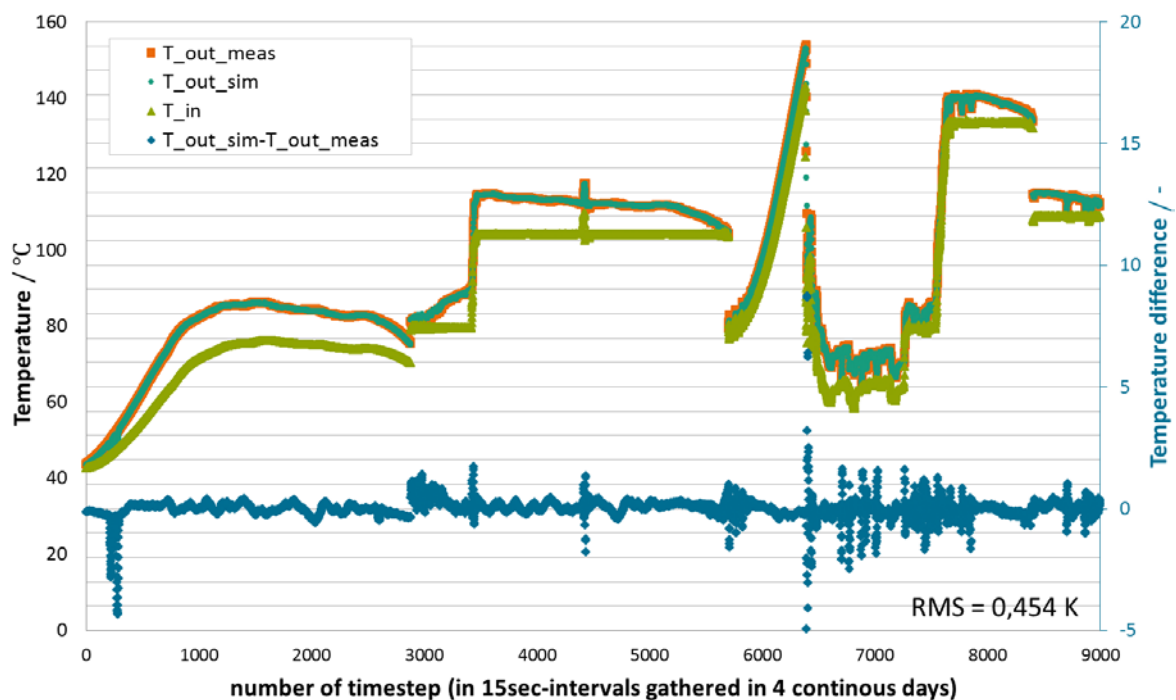
<sup>5</sup> Hofer, A.; Büchner, D.; Heimsath, A.; Fahr, S.; Kramer, K.; Platzer, W.; Scholl, S. (2015): Comparison of Two Different (Quasi-) Dynamic Testing Methods for the Performance Evaluation of a Linear Fresnel Process Heat Collector. In: Energy Procedia (69), S. 84–95.



a) measured and simulated data base for QDT-method



b) measured and simulated data base for DT-method



**Abbildung 7:** (Linke Achse) Simulierte gegenüber gemessener Kollektoraustrittstemperatur (in dunkelgrünen Kreisen bzw. orange-farbenen Rechtecken dargestellt) in Abhängigkeit der gemessenen Eintrittstemperatur (in hellgrünen Dreiecken dargestellt) für a) die quasi-dynamische (QDT) Methode und b) die dynamische (DT) Methode. (Rechte Achse) Differenz zwischen gemessener und simulierter Kollektoraustrittstemperatur (in blauen Karos dargestellt).<sup>5</sup>

## II.1.2. AP2 – Entwicklung von Richtlinien für Abnahmetests (DLR)

Ziel des Arbeitspaketes ist die Entwicklung von Abnahmetests zur Bestimmung/Verifizierung von technischen Parametern des Solarfeldes wie dem optischen Wirkungsgrad und den thermischen Verlusten mit einer möglichst hohen Genauigkeit innerhalb eines möglichst kurzen Testzeitraums. Auf Basis dieser Parameter kann mit entsprechenden Ertragsmodellen und Annahmen zu Solarstrahlung, Betriebsweisen und Wartungseinflüssen der langfristige Solarfeld-/Kraftwerksertrag prognostiziert werden.

Die Hauptherausforderung bei der Solarfeldabnahme besteht darin, möglichst aus typischem Solarfeldbetrieb an einer bestimmten Anzahl von Testtagen innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums unter Feldmessbedingungen belastbare Aussagen bezüglich der Leistungsfähigkeit zu erzielen. Dabei ist der genaue Betriebszustand im Gegensatz zu Abnahmetests bei fossiler Energiewandlung und vergleichbarer Kraftwerksleistung nicht im Vorfeld festlegbar, sondern mit der gerichteten Solarstrahlung als Energiequelle tageszeit-, jahreszeit- und wetterabhängig und nur in Maßen planbar. Somit gilt es, ein ausgedehntes Solarfeldsystem bezüglich seiner momentanen Leistung und seinem effektiven Betriebszustands genau zu charakterisieren und aus den Daten auf seine Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur, Einstrahlung und Einfallswinkel zu schließen. Die Qualität erzielter Aussagen beruht maßgeblich auf

- unabhängiger Messtechnik zur genauen Erfassung der momentanen Solarfeldleistung, der Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen sowie des Betriebszustands mit geringer Messunsicherheit,
- erprobten Gleichungssystem und Routinen zur Verarbeitung, Analyse und Auswertung dynamischer Messdaten,
- robusten Routinen zur entkoppelten Identifikation repräsentativer Parameter sowie
- validierter Solarfeldmodellierung und geeigneten Ertragsprognosen.

Das DLR hat im Rahmen von Vorgängerprojekten und Industrienaufträgen bereits umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der in-situ Vermessung von linienfokussierenden Kollektoren und Loops gesammelt, erste Ansätze zur Solarfeldabnahme erarbeitet und vorgeschlagen.<sup>6</sup> Im Rahmen dieses Vorhabens wurden darauf basierend einzelne Aspekte wie die Kalibration der mobilen Messtechnik im Detail untersucht, Verbesserungen erprobt, die Methode in der Praxisanwendung im Loopmaßstab demonstriert und validiert und in eine Best Practice Guideline eingebracht.

### II.1.2.1. AP2.2 – Anforderungen an Abnahmetests

Abnahmetests für Solarfelder sollen zum Zeitpunkt der Fertigstellung und Inbetriebnahme qualifizierte Aussagen über zu erwartende Solarfelderträge in Bezug auf die thermische Nutzleistung liefern. Neben dem Prognosewert selbst ist die Zuverlässigkeit der Aussage/Vorhersage eine bedeutende Information, da Unsicherheiten in der Praxis entsprechende Risikoaufschläge und damit höhere Stromgestehungskosten zur Folge haben. Bisherige und aktuelle Arbeiten haben gezeigt, dass die Messunsicherheit<sup>7</sup> der verwendeten Messausrüstung und die Wahl der Be-

<sup>6</sup> N. Janotte: Requirements for representative Acceptance Tests for the Prediction of the Annual Yield of Parabolic Trough Solar, Dissertation, Fields Shaker Verlag, Aachen (Deutschland), 2012.

<sup>7</sup> N. Janotte, E. Lüpfer, R. Pitz-Paal, K. Pottler und M. Eck, E. Zarza und K.-J. Riffelmann: Influence of Measurement Equipment on the Uncertainty of Performance Data from Test Loops for Concentrating Solar Collectors. Journal of Solar Energy Engineering, Vol: 132, Issue: 3, 2010.

triebspunkte<sup>8</sup> in diesem Hinblick besonders relevant sind. Letztere unterscheidet sich stark je nachdem, ob nur die Leistungsfähigkeit generell nachgewiesen oder ebenfalls Performance Parameter bestimmt werden sollen.

Konkrete Kriterien ergaben sich im Laufe der Arbeiten aus den weiteren Unterarbeitspaketen und werden hier nicht separat aufgeführt. Sie finden sich in einem Entwurf einer im Rahmen des Projekts gemeinsam von DLR und Fraunhofer ISE erstellten Best Practice Guideline zur dynamischen in-situ Leistungsfähigkeit Vermessung von Linienfokussierenden Kollektoren und Solarfeldabnahme wieder. Er trägt den Arbeitstitel: "Best Practice Guideline: Dynamic in situ Performance and Acceptance Testing of Line-Concentrating Collectors and Solar Fields" und dokumentiert den neuen Stand des Wissens aus AP 1 und AP 2. Die wesentlichen Inhalte der Best Practice Guideline wurden auf der SolarPACES Konferenz 2015 in Kapstadt im Task I Meeting vorgestellt und diskutiert. Diskussionsergebnisse und Feedback werden momentan in der ersten öffentlichen Version zum anschließenden externen Review unter internationalen Experten überführt.

### **II.1.2.2. AP2.3 – Feldmesstechnik**

Für die Aussagefähigkeit von Performance Tests zum Nachweis der Leistungsfähigkeit von Solarfeldern ist eine niedrige Unsicherheit von thermischen Messungen, die damit verbundene hohe Signifikanz von Messdaten und daraus bestimmten charakteristischen Parametern entscheidend. Insbesondere im Rahmen von Abnahmemessungen ist darüber hinaus ihre Unabhängigkeit von besonderer Wichtigkeit. Aus diesem Grund und wegen ihrer guten Nachverfolgbarkeit werden nichtinvasive Sensoren favorisiert (Anlegefühler, Ultraschall-Durchflussmessung). Um damit eine vergleichbare Messunsicherheit wie mit geeigneten fest eingebauten Sensoren zu erreichen, sind Erfahrung bei der sorgfältigen Installation und eine detaillierte Charakterisierung des Sensorverhaltens notwendig. Insbesondere werden für die Erprobung, Charakterisierung und Kalibration der Sensoren Messstrecken mit entsprechenden Referenzsensoren benötigt. Eine besondere Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang das Erreichen der relevanten Kraftwerksbetriebsbedingungen in den Mess-/Kalibrationsstrecken dar.

In diesem Unterarbeitspaket wurden Anforderungen an Messtechnik für Abnahmetests erarbeitet und entsprechende Kapazitäten zur Charakterisierung und Kalibrierung von typischerweise eingesetzten Sensoren aufgebaut. Konkret wurde zu diesem Zweck auf der Plataforma Solar de Almería eine Mess- und Kalibrationsstrecke für Temperatur- und Durchflusssensoren an einer bestehenden Kollektortestanlage sowie eine Kalibrationsstation für thermische Strahlungssensoren implementiert. Weiterhin wurden die erforderlichen Kalibrations- und Charakterisierungsprozeduren erarbeitet und dokumentiert.

### **Temperaturmessung**

Die Hauptherausforderung in der Messung von Fluidtemperaturen mittels Anlegefühlern besteht in der systematischen Abweichung zwischen Fluidtemperatur im Rohr und gemessener Rohrwandtemperatur, die sich aufgrund des Wärmewiderstands und der relativ kühlen Umgebung bei hohen Fluidtemperaturen einstellt. Diese gilt es durch einen optimalen thermischen Kontakt

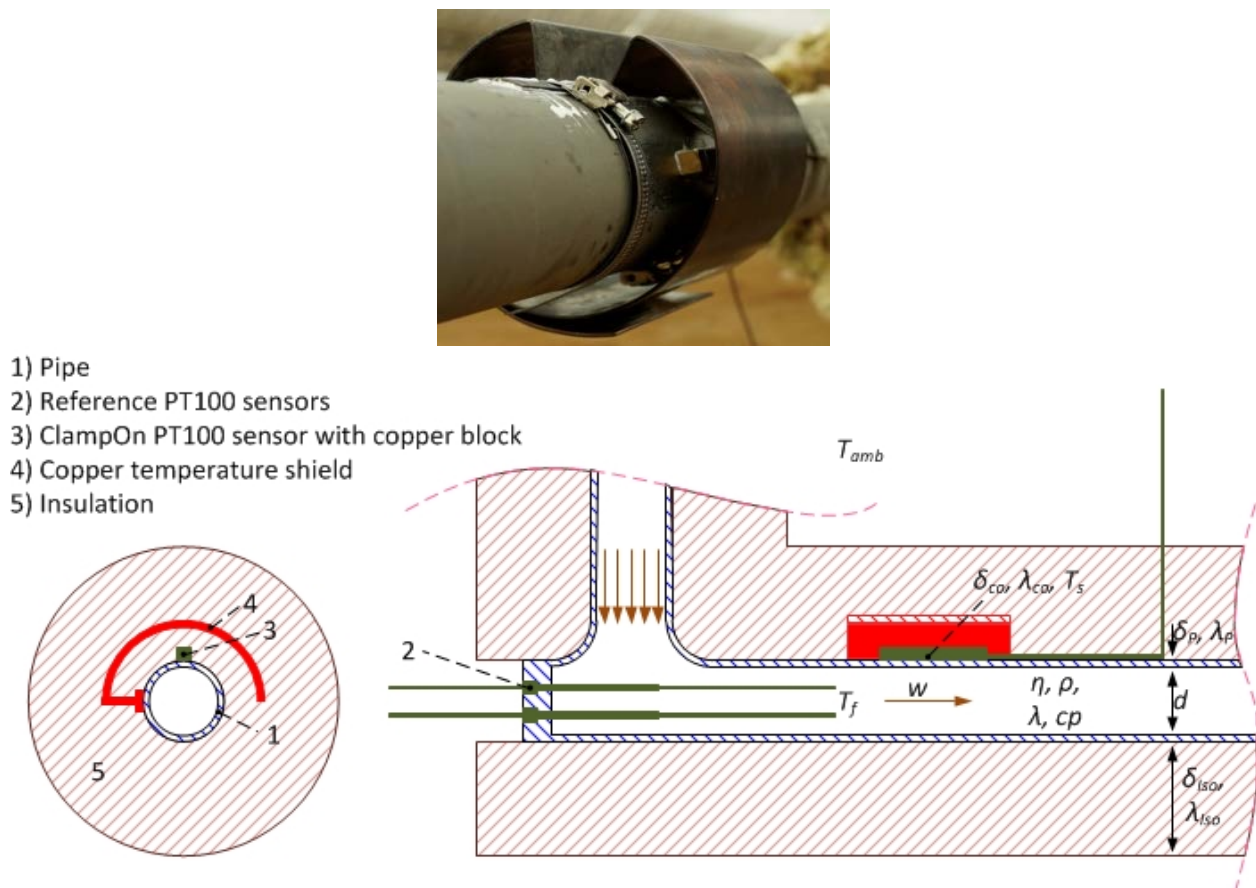
---

<sup>8</sup> N. Janotte: Requirements for representative Acceptance Tests for the Prediction of the Annual Yield of Parabolic Trough Solar, Dissertation, Fields Shaker Verlag, Aachen (Deutschland), 2012.

der Fühler und ihre Isolation zur Umgebung zu minimieren und die verbleibende Abweichung reproduzierbar und damit korrigierbar zu machen.

Auf Basis des bereits bestehenden DLR Konzeptes für Anlegefühler wurden mehrere Konstruktionen mit Unterscheidungsmerkmalen in der Geometrie der Sensorhalterungen sowie der Temperaturschilde entwickelt. Die Konstruktionen wurden darauf ausgelegt, eine möglichst hohe Anpresskraft für einen guten thermischen Kontakt zu gewährleisten und die Temperaturgradienten zwischen der dem Rohr abgewandten Seite des Pt100 und der Umgebung zu reduzieren. Diese Temperaturanlegefühlerkonstruktionen wurden mit Messwerten benetzter Pt-100 Referenzsensoren verglichen und das Verfahren dokumentiert.

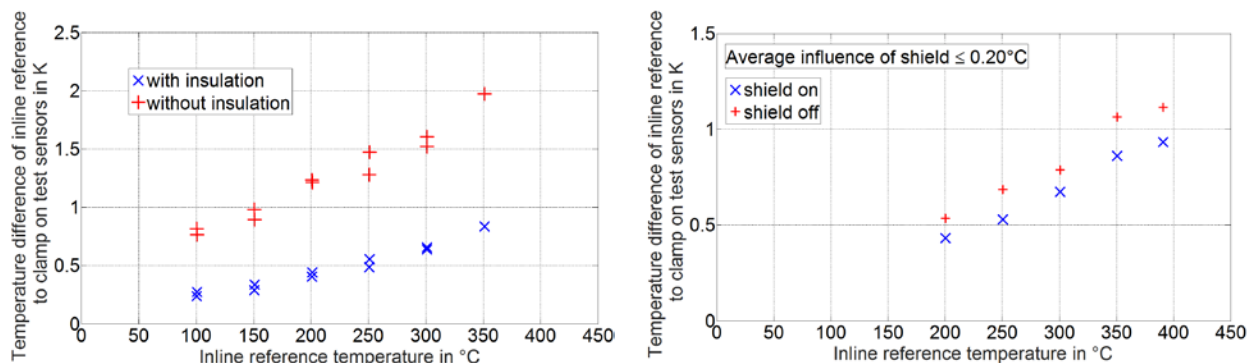
Untersucht wurde insbesondere der Einfluss der Temperatur, des Massenstroms, der Isolierungsgüte sowie des Anpressdrucks der verschiedenen Anlegefühler Konstruktionen auf die sich ergebenden Temperaturabweichungen zu den Referenzsensoren. Auf Basis von Messergebnissen mehrerer Vergleichsmessungen von entwickelten Anlegefühlerdesigns wurde das in Abbildung 8 illustrierte Konzept mit einem Messingblock zur Homogenisierung der Temperatur um den Sensor und einem Kupfertemperaturschild zur Reduktion der Umgebungseinflüsse zur weiteren Charakterisierung ausgewählt und weiter optimiert.



**Abbildung 8:** Skizzierter Messaufbau von Temperaturanlegefühler sowie redundanter benetzter Referenzsensoren an der Kalibrationsstrecke (unten), Temperaturanlegefühler montiert mit Messingblöcken und Temperaturschild ohne Isolierung (oben)

Weiterhin demonstriert werden konnte in den Messreihen die Relevanz einer guten Isolation (Abbildung 9, links) der positive Einfluss der Temperaturschild (Abbildung 9, rechts), sowie die

Notwendigkeit einer turbulenten Rohrströmung zur Sicherstellung eines ausreichenden Wärmeübergangs vom Wärmeträgerfluid auf das Rohr.



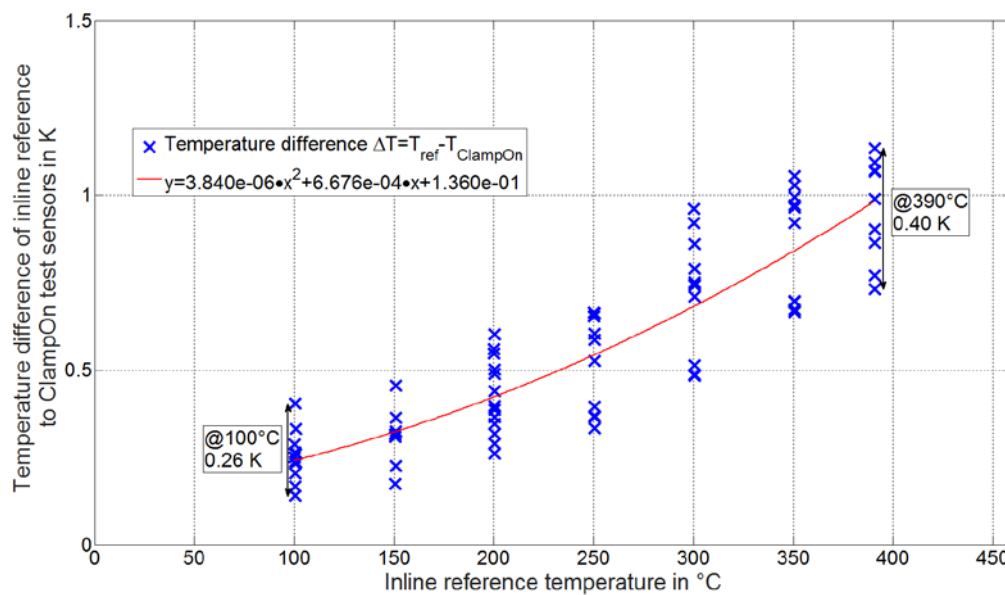
**Abbildung 9:** Einfluss von Isolation (links) und Temperaturschild (rechts) auf die Abweichung zwischen Temperaturmesswerten von Anlagefühlern und benetzten Referenzfühlern

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, führt eine Zunahme der Fluidtemperatur erwartungsgemäß zu einer Zunahme der Temperaturdifferenz sowie der Streuung der Datenpunkte. Diese systematische Tendenz kann mittels einer anwendungsspezifischen Korrekturfunktion ausgeglichen werden. Die Streuung stellt die bleibende vom Temperatursensor und von der Datenerfassung unabhängige Unsicherheit des Anlagefühler-Messverfahrens dar, welche trotz technischer Handhabung und Montage der Pt100 Sensoren auftritt. Diese kann sich aus verschiedenen Quellen wie Sensorhysterese, Anpresskraft, Güte und Qualität Isolierung und Umgebungsbedingungen zusammensetzen und ist bei der Korrektur der Messwerte auf die Fluidtemperatur zu beachten. Die Abbildung 10 dargestellte empirisch generierte Korrekturfunktion ist nur anwendbar bei Temperaturen zwischen 100°C und 400°C, sofern die Rohrleitungen den gängigen Loop-Designs für Felder mit EuroTrough-Parabolrinnen-Kollektoren entsprechen und von einem vergleichbaren Thermoöl durchströmt werden. Des Weiteren muss der zulässige temperaturabhängige Reynoldszahlenbereich berücksichtigt werden (siehe Tabelle 1). Eine Unterschreitung führt zu erhöhten Unsicherheiten, aufgrund des Zusammenhangs zwischen Reynoldszahl und Wärmeübergangskoeffizienten.

**Tabelle 1:** Zulässige temperaturabhängige Reynoldszahlen-Bereiche

T in °C	100	150	200	250	300	350	390
Re	$\geq 30.000$	$\geq 50.000$	$\geq 70.000$	$\geq 100.000$	$\geq 150.000$	$\geq 200.000$	$\geq 200.000$





**Abbildung 10:** Temperaturdifferenz zwischen Tauchfühler als Referenz und Anlegefühler als Funktion der Fluidtemperatur mit Korrektur-Polynom für Anlegefühler für Messkonfiguration an typischen EuroTrough-Parabolrinnen-Kollektorloops und Außentemperatur

### Durchflussmessung

Zur Kalibration und Charakterisierung von Ultraschall-Durchflusssmessgeräten unter Kraftwerksbedingungen sind insbesondere die Verwendung des entsprechenden Wärmeträgermediums, das Vorhandensein betriebsrelevanter Durchflussraten und einer hochpräzisen Referenz entscheidend. Diese Kombination ist in existierenden Testständen bisher nicht vorhanden und wäre nur unter sehr großem finanziellem Aufwand erreichbar. Daher wurden in diesem Forschungsvorhaben zwei Wege beschritten: Zum einen wurde die Möglichkeit einer Kalibration mittels Bypass im Kraftwerk demonstriert und zum anderen eine grundlegende Charakterisierung und Optimierung des Messaufbaus an einem Teststand durchgeführt.

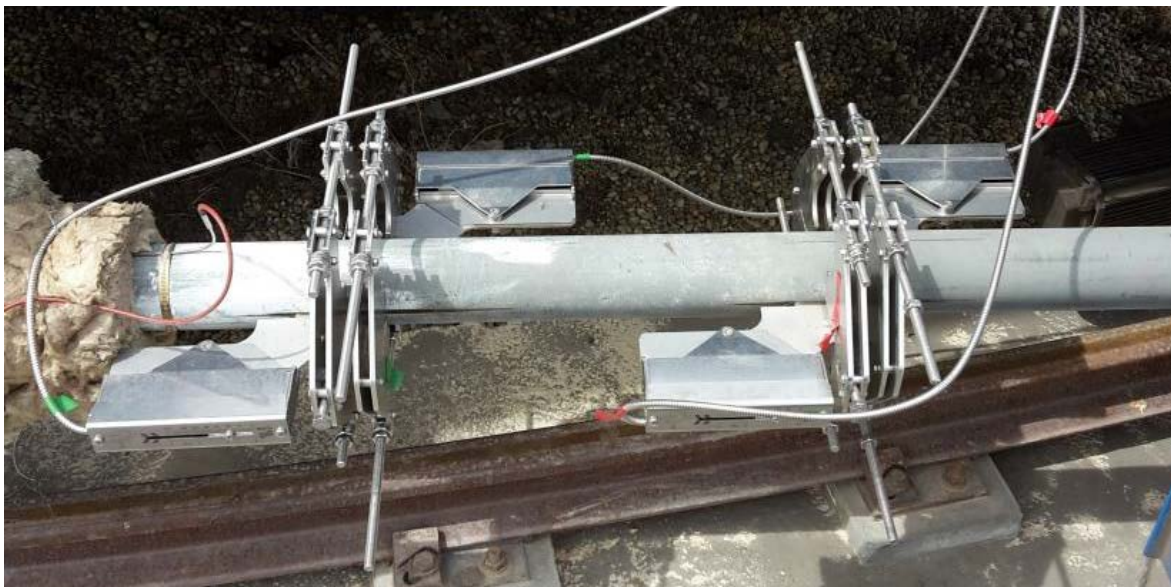


**Abbildung 11:** Bypass zur Kalibration von Durchflusssensoren im Solarkraftwerk Kuraymat (Ägypten)



Dazu war bereits im Projekt enerMENA ein Mess- und Kalibrations-Bypass ausgelegt, beschafft und im Solarfeld des ISCCS Kraftwerks Kuraymat, Ägypten aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Der fertig installierte Bypass ist in Abbildung 11 abgebildet. Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets wurde im Herbst 2012 vor Ort eine erste Feldkalibrationskampagne im Kraftwerk durchgeführt, dabei zeigten sich allerdings unerwartete Probleme bezüglich der Signalgüte und weiterer Charakterisierungsbedarf, so dass eine grundlegendere Untersuchung sinnvoll erschien. Entsprechend wurde an der Kalibrationsstrecke mit Coriolis-Referenzsensor (Messunsicherheit von  $< 0,8\%$  ( $2\sigma$  bei  $345^\circ\text{C}$  und  $5\text{ kg/s}$ )) eine ausführliche Charakterisierung der bisher verwendeten Clamp-on Ultraschallsensoren bei verschiedenen Fluidtemperaturen und Durchflüssen durchgeführt. Dabei ergaben sich insbesondere bei hohen Fluidtemperaturen ( $\geq 250^\circ\text{C}$ ) signifikante Abweichungen und keine zufriedenstellenden Ergebnisse im Hinblick auf Signalqualität und Zuverlässigkeit. Da es sich aber hierbei zum einen um einen für den Solarfeldbetrieb besonders relevanten zum anderen für den dauerhaften Sensorbetrieb äußerst kritischen Temperaturbereich handelt, wurde die Ergänzung des bestehenden Messsystems um ein Bauteil zur thermischen Entkopplung von heißer Rohrleitung und Sensoren bei weiterhin guter akustischer Ankopplung als sinnvoll erachtet. Dies kann über eine alternative Montageoption mittels sogenannter Wave-Injektoren (akustische Kopplung über Distanz-Stücke) erreicht werden. Ihr Potential aber auch die montagetechnischen Herausforderungen wurden in einer Probemessung erfolgreich demonstriert. Wave-Injektoren ergänzen als derzeit einzig erprobte und kommerziell verfügbare Möglichkeit der eingriffsfreien und unabhängigen Durchflussmessung unter typischen Solarfeldbetriebsbedingungen das mobile Feldlabor.

In Rahmen mehrerer Vergleichsmessungen unter Kraftwerksbetriebsbedingungen (Temperaturen oberhalb von  $300^\circ\text{C}$ , Massenströmen von  $3\text{--}6\text{ kg/s}$  an einer 3“-Rohrleitung unter Verwendung des Silikonöls Syltherm 800) wurden die Clamp-on Ultraschall-Durchflusssensoren mit Wave-Injektoren an der Kalibrationsstrecke charakterisiert. Dabei wurde aufgrund einer höheren Unsicherheit bei dem aufwendigen Montage- und Einmessprozess der Wave-Injektoren, stets eine zweifach redundante Ultraschall Durchflussmessung aufgebaut (Abbildung 12). Das ermöglicht jederzeit die Detektion von Montagefehlern und anderen Unsicherheiten auf Grundlage des Vergleiches der beiden unabhängigen Signale.



**Abbildung 12:** Zweifach redundante nicht invasive Ultraschall-Durchflussmessung mit Wave-Injektoren an der Kalibrationsstrecke

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Vergleichsmessung bei einer Fluidtemperatur von 345°C und Massenströmen von 3, 4 und 5,5 kg/s. Trotz veränderlicher Massenströme wurde stets ein homogenes Rauschen der beiden Ultraschallsignale von +5% bis -3% um das Coriolis Referenzsignal detektiert (minütliche Mittelwerte). Bei halbstündlichen Mittelwerten lagen beiden Ultraschallsignale etwa 1% unterhalb des Massenstromsignals des Coriolissensors.

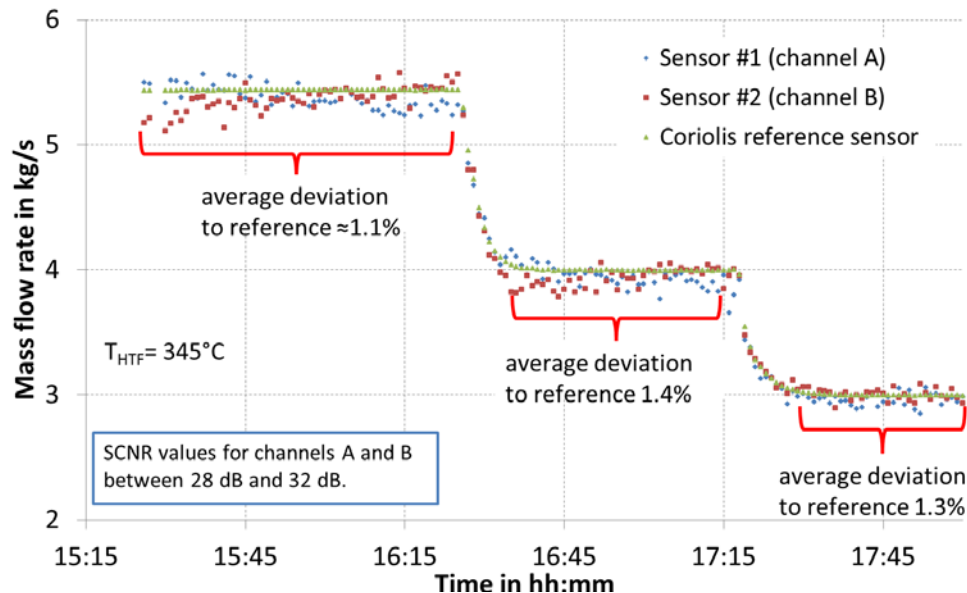


Abbildung 13: Massenstrom Vergleichsmessungen des Coriolissensors (Referenz) und zweier Ultraschallsensorpaare bei einer Thermoöltemperatur von 345 °C

Durch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erscheint eine Feldkalibration mittels Bypass und die Reduktion der Messunsicherheiten von Clamp-on Ultraschall-Durchflusssensoren machbar, wenn auch aufwändig. Für die oben beschriebene Charakterisierung des verbesserten Messaufbaus stand ein Teststand mit Syltherm800 zur Verfügung, eine Wiederholung mit dem in derzeitigen Kraftwerken typischerweise genutzten Wärmeträgerfluid (eutektisches Mischung von Biphenyl und Diphenylether) wäre wünschenswert, war aber durch fehlenden erneuten Zugang zum bestehenden Kalibrationsbypass in Kuraymat im Rahmen des Projekts nicht mehr möglich. Insgesamt wird eine Kalibration der Durchflusssensoren im Kraftwerk selbst unter Nutzung eines speziellen Kalibrationsbypasses angestrebt. Derzeit ist die Feldkalibration und Charakterisierung von Ultraschallanlegefühlern auf die typischen Durchflüsse von einzelnen Parabolrinnen-Loops beschränkt, da für größere Durchflüsse keine entsprechenden Kalibrationskapazitäten bestehen.

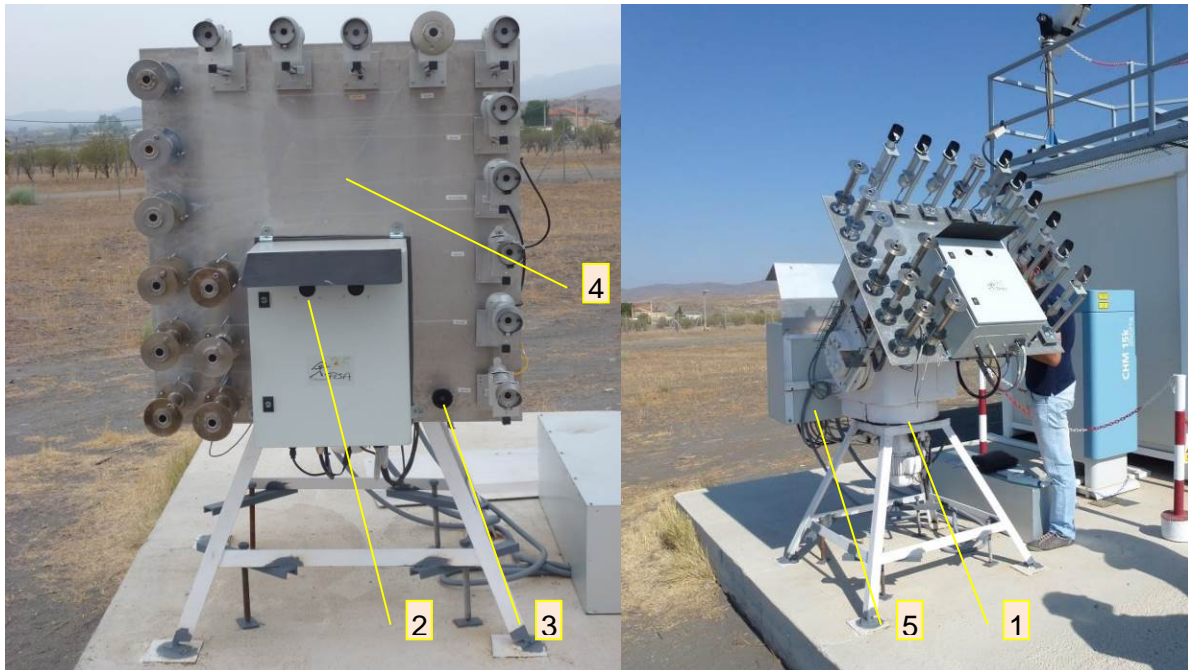
### Einstrahlung

Der Aufbau sowie die Inbetriebnahme einer Pyrheliometer-Kalibrierstation wurde im Rahmen einer Kooperation mit Ciemat, an der METAS Einrichtung der Plataforma Solar de Almeria (PSA), durchgeführt und in diesem Projekt ergänzt.

Die in Abbildung 14 dargestellte Kalibrierstation besteht aus einem zweiachsig nachführbaren Heliostaten, zwei PMO6-CC Absolute-Cavity-Pyrheliometer als Referenzen, einem Sonnensensor zur Verbesserung der Nachführgenauigkeit des Heliostaten, einer Montageplatte mit einzeln ausrichtbaren Prüflingen sowie Schaltschränken für die Datenerfassung und Heliostat-

steuerung. Alle Komponenten wurden entsprechend der Anforderungen der ISO 9059 „calibration of field pyrheliometer by comparison to a reference pyrheliometer“ ausgewählt.

In einer zweiwöchigen Messkampagne im Juni 2014 wurden 19 Prüflinge eingesetzt. Die Rohdaten wurden entsprechend der ISO 9059 verarbeitet und neue Kalibrationskonstanten ermittelt. Die zumeist wetterabhängigen Vorgaben zur Datenselektion gemäß ISO 9059 wurden mittels verschiedener auf der PSA befindlicher meteorologischen Messstationen überprüft. Zur Plausibilitätskontrolle wurden die Referenzsignale mit den Signalen der DLR Präzisionsstrahlungsmessstation verglichen und keine Auffälligkeiten festgestellt.



**Abbildung 14:** METAS Pyrheliometer Kalibrierstation: zweiachsig nachführbarer Heliostat (1), zwei Absolute-Cavity-Pyrheliometer als Referenzen innerhalb eines Schaltschranks mit Irissichtfenster(2), Sonnensensor (3), Montageplatte mit Pyrheliometer Prüflingen (4), Schaltschrank für Datenerfassung und Heliostatsteuerung (5)

Insgesamt wurde im Rahmen dieses Unterarbeitspakets eine Einrichtung zur Feldkalibration von Pyrheliometern auf der PSA fertig gestellt und das zugehörige Verfahren erprobt und dokumentiert und gleichzeitig alle Pyrheliometer unter Sonnenlicht mehrfach (Juni 2014, September 2015) rekaliert. Bestehende Kalibrationsverfahren wurden auf Ihre Anwendbarkeit untersucht und weiterentwickelt. Ein neu entwickeltes automatisiertes Datenauswahlverfahren, basierend auf Wolkenkameras, wurde eingeführt.

Die Ergebnisse aller durchgeführten Kalibrierungen und ausgedehnten Tests sind in die in Tabelle 2 aufgeführten Beschreibungen der Vorgehensweise zur Kalibration und Feldmontage von für den Leistungsnachweis von Solarfeldern relevanten Sensoren und Messtechniken eingegangen. Entsprechend des Umfangs und der Schwerpunkte der im Projekt durchgeführten Arbeiten unterscheiden sich die Sensorkalibrations- und Sensoreinsatzdokumentationen und werden im Rahmen weiterer Aktivitäten fortlaufend ergänzt und überarbeitet werden.



**Tabelle 2:** Übersicht über vom DLR erarbeitete (interne) bzw. genutzte Richtlinien zu Kalibration und Feldeinsatz von performance-relevanten Sensoren

Messgröße	Richtlinie zur Sensorkalibration	Richtlinie für den Feldeinsatz
<b>HTF Temperatur</b>	KONTAS Handbuch Abschnitt 9.6	Installation Manual for Clamp-On Temperature Sensors
<b>Direktstrahlung</b>	Step-by-step Description of Radiometer Calibration Based on ISO Standards	Hersteller Manuals für Tracker und Sensoren
<b>HTF Durchfluss</b>	Clamp-On Ultrasonic Flow Measurement and Calibration Manual	Clamp-On Ultrasonic Flow Measurement and Calibration Manual

### **II.1.2.3. AP2.4 – Felderprobung/Messkampagnen**

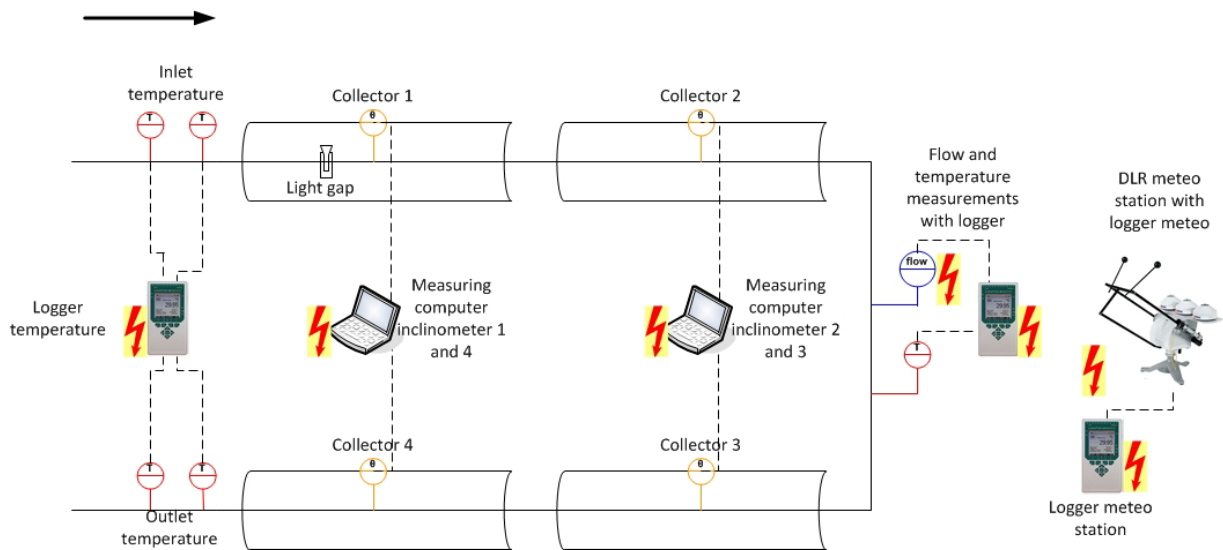
Ziel der Arbeiten in diesem Unterarbeitspaket war die Felderprobung der zum Leistungsnachweis angepassten Messtechnik und erarbeiteten Methode. Dazu waren ursprünglich zwei Messkampagnen in Solarfeldern bestehender Parabolrinnen-Kraftwerke vorgesehen. Aufgrund von Interessensverschiebungen durch Änderung in der CSP-Förderung in Spanien und der politischen Situation in Nordafrika wurde jedoch trotz starker Bemühungen lange Zeit kein Zugang gewährt. Entsprechend konnten diese Arbeiten in den ersten zweieinhalb Projektjahren nicht durchgeführt, sondern die Messsysteme zuerst nur wie im vorherigen Abschnitt beschrieben in Anwendungen und Kalibrationskampagnen unter vergleichbaren Einsatzbedingungen auf der Plataforma Solar de Almería eingehend getestet werden.

2015 wurde wissenschaftlichen Mitarbeitern des DLR von den Kraftwerksbetreibern Marquesado Solar der Zugang zum Andasol 3 Kraftwerk – einem 50 MWe Parabolrinnen-Kraftwerk in Südspanien - gewährt. Dort konnten innerhalb von zwei Monaten nacheinander drei Parabolrinnenkollektor-Loops mit einem mobilen nicht invasiven Feldlabor thermisch vermessen werden.

Mittels des mobilen Messlabors wurden wie in Abbildung 15 dargestellt, die folgenden Messgrößen aufgezeichnet:

- Loop Eintrittstemperatur (redundant)
- Loop Austrittstemperatur (redundant)
- Volumenstrom (redundant)
- Temperatur an Volumenstrom-Messstelle
- Umgebungstemperatur
- Solare Direktstrahlung (Direct Normal Irradiation, DNI)
- Nachführungswinkel aller vier Kollektoren
- Spiegelreflektivität

Mit Ausnahme des Reflexionsgrads der Spiegel (manuelle Messung einmal täglich) wurden alle Messgrößen über ein miteinander vernetztes Datenerfassungssystem sekundlich aufgezeichnet. Der Reflexionsgrad der Spiegel wurde am Ende eines jeden Testtages manuell mittels eines mobilen Reflektometers gemessen und diente als Maß für die Sauberkeit des Loops.



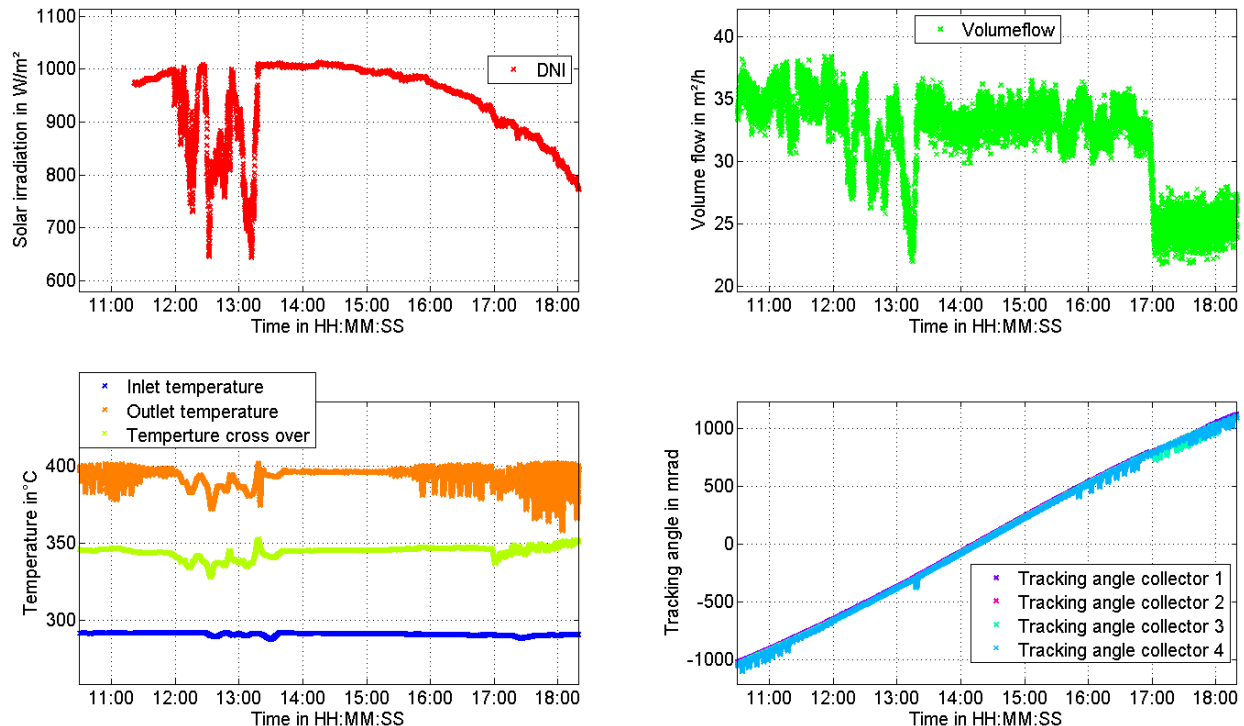
**Abbildung 15:** Übersichtsplan des DLR Messnetzwerks zur thermischen Vermessung eines Parabolrinnenkollektor-Loops des Andasol 3 Solarkraftwerks

Die Fluidtemperaturen und Volumenströme wurden über die bereits beschriebenen Anlegefühlersysteme gemessen. Die Einstrahlungsstärke wurde über ein auf einem mobilen Solartracker montiertes Pyrheliometer und die Umgebungstemperatur an einer mobilen Wetterstation gemessen. Für die Nachführungswinkel wurden jeweils zwei Inklinometer pro Kollektor montiert. In Abbildung 16 ist das mobile Feldlabor im Einsatz dargestellt.



**Abbildung 16:** Solarfeld Andasol 3 Kraftwerk – vermessener Loop im Vordergrund (oben links), Tracker mit Einstrahlungsmessung (oben rechts), Ultraschall-Volumenstrommessung (unten links), Fluidtemperaturmessung (unten Mitte) und Datenerfassungsmodul- Teil des Netzwerks (unten rechts)

Während des Testzeitraums wurden an den drei Parabolrinnen-Kollektor-Loops an insgesamt elf Tagen Messungen durchgeführt und direkt zum Abschluss eines jeden Messtages auf Plausibilität kontrolliert. Ein typischer Messtag ist in Abbildung 17 dargestellt.



**Abbildung 17:** Typischer Tagesdatensatz (Direktstrahlung, Volumenstrom, Fluidtemperaturen und Nachführungswinkel) eines Kraftwerksloops aufgenommen vom mobilen Feldlabor

Diese Messkampagne demonstrierte erfolgreich die Machbarkeit einer thermischen Leistungsmessung eines Loops mittels Mobilem Feldlabors während des Normalbetriebs eines kommerziellen Kraftwerks und wurde per Messbericht dokumentiert.

#### II.1.2.4. AP2.5 – Auswertung der Feldtests

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Auswertung von Solarfelddatensätzen aus Kraftwerksanwendungen entscheidend weiterentwickelt. Die Arbeiten basieren auf von Betreibern in Kooperationen zur Verfügung gestellten Betriebsdaten verschiedener Loops und ganzer bzw. Teil-Parabolrinnen-Solarfelder an verschiedenen Standorten. So konnte nicht nur der Mangel an gemessenen Felddaten überbrückt, sondern auch verschiedenste Datenkonstellationen untersucht werden.

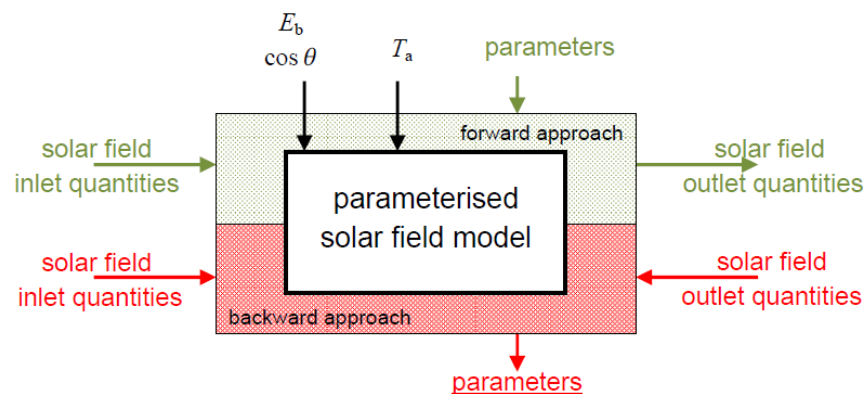
- Betriebsdaten eines Prototyp-Kollektor-Loop im Kraftwerk
- Betriebsdaten eines regulären Kollektorloop eines kommerziellen Parabolrinnen-Kraftwerks
- Betriebsdaten eines Solarfelds und Teilsolarfeldern eines kommerziellen Parabolrinnen-Kraftwerks
- Messdaten aus regulären Kollektorloops eines kommerziellen Parabolrinnen-Kraftwerks

Der Hauptaufwand in der Datenanalyse (besonders aus fremden Quellen wie Betriebsdaten) liegt in der Bereitstellung, Nutzbarmachung und Überprüfung von Informationen, die sich in ihrer



Art, Qualität und Aufbereitung individuell stark unterscheiden. Anders als ursprünglich geplant ist es damit sinnvoller Best Practice Regeln zur Datenvorverarbeitung zusammenzustellen anstatt ein universell einsetzbares aber notwendigerweise komplexes und trotzdem unvollständiges Programm zu schaffen. Diese Regeln enthalten eine definierte Schnittstelle zur standardisierten Modellierung und Analyse der Daten und trennen so ein fallspezifisch angepasstes Pre-processing von einer standardisierten Auswertung.

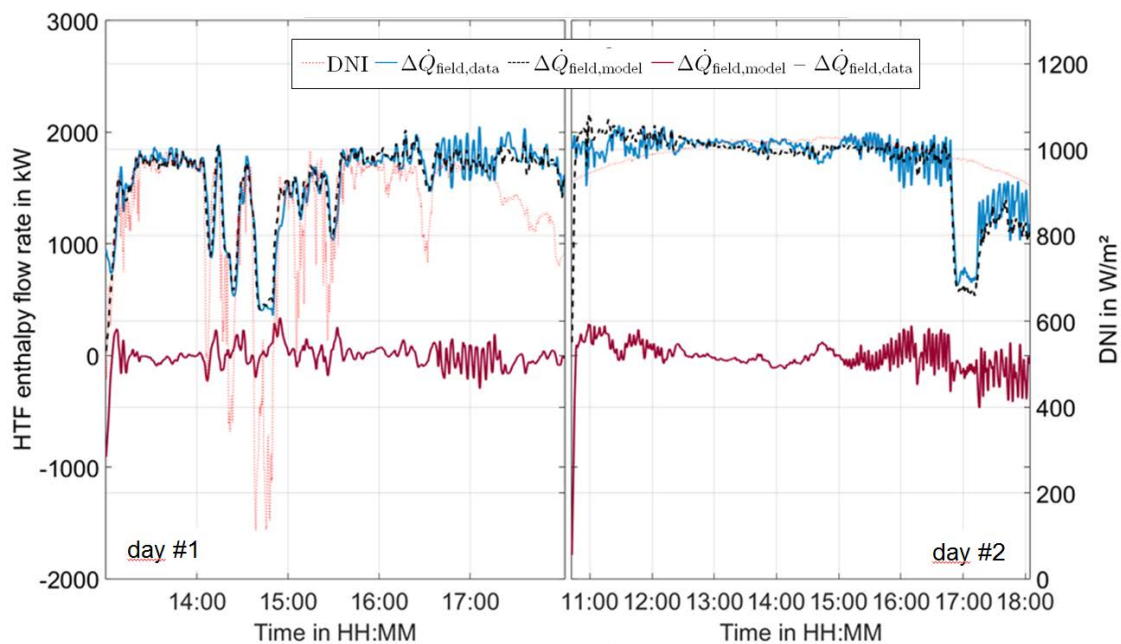
Aufbauend auf diesen vorverarbeiteten Betriebs- bzw. Testdaten wird der Verlauf der Leistung über den betrachteten Zeitraum ermittelt, mit den Simulationsergebnissen eines dynamischen Modells unter denselben Randbedingungen verglichen und iterativ die Leistungsparameter angepasst, bis ein definiertes Abweichungskriterium unterschritten ist. Der resultierende Parametersatz beschreibt die Leistungsfähigkeit des Systems. Alternativ zur Solarfeldleistung kann auch seine Austrittstemperatur als Zielgröße bei der Optimierung genutzt werden. Insgesamt haben sich diese Vorgehensweise (s. auch Abbildung 18) und das bestehende parametrisierte dynamische Solarfeldperformance-Modell (PDPM) im Praxistest bewährt. Besonders im Vergleich zu quasi-stationären Auswertungen (bisheriger Stand der Technik) erwies es sich das PDPM als vorteilhaft.



**Abbildung 18:** Illustration des PDPM Modelansatzes zur Parameteridentifikation (backward approach) und Ertragssimulation (forward approach)<sup>9</sup>

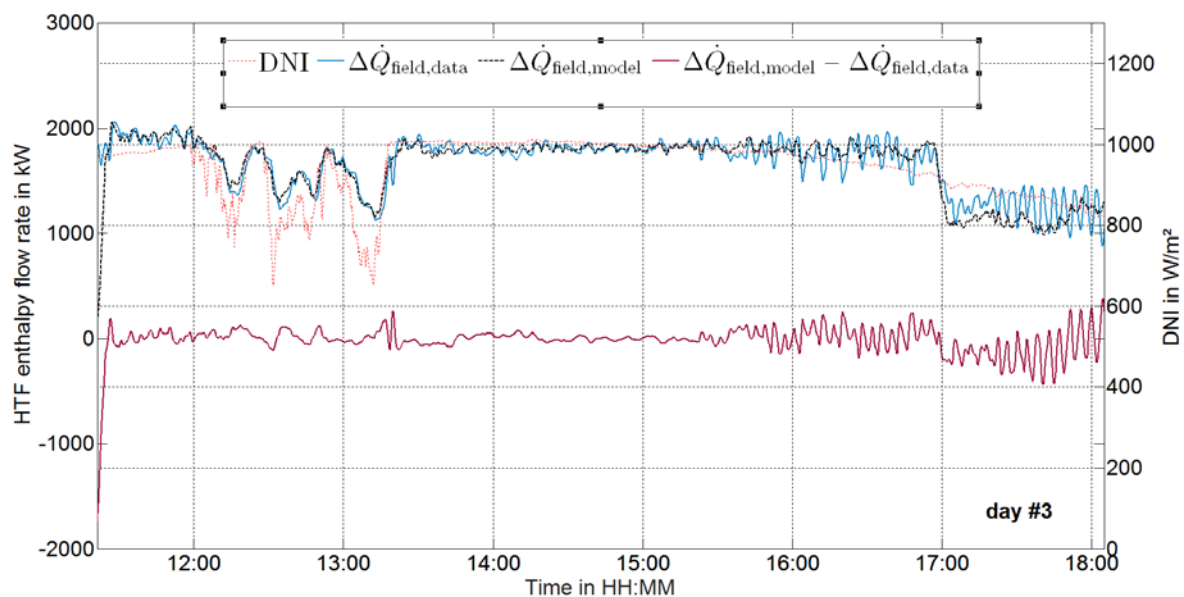
Die gemessene thermische Momentanleistung, sowie die aus dem PDPM berechnete Momentanleistung für zwei Messtage sind in Abbildung 19 dargestellt. Sie zeigt eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von -0,39% (bezogen auf die gemessene Leistung) bei der über die Zeit integrierten thermischen Leistung. Hierbei ist zu beachten, dass die dargestellten Messtage auch für die Parameteridentifikation eingesetzt wurden.

<sup>9</sup> N. Janotte, E. Lüpfer, R. Pitz-Paal (2012): Acceptance Testing and advanced Evaluation Strategies for commercial parabolic Trough solar Fields, Proceedings of 18<sup>th</sup> SolarPACES International Symposium, Marrakech (Morocco) 2012.



**Abbildung 19:** Gemessener und mittels PDPM berechneter Verlauf der thermischen Leistung eines Kraftwerksloops für zwei Messtage, dargestellte Messtage wurden zur Ermittlung der Leistungsparameter eingesetzt.

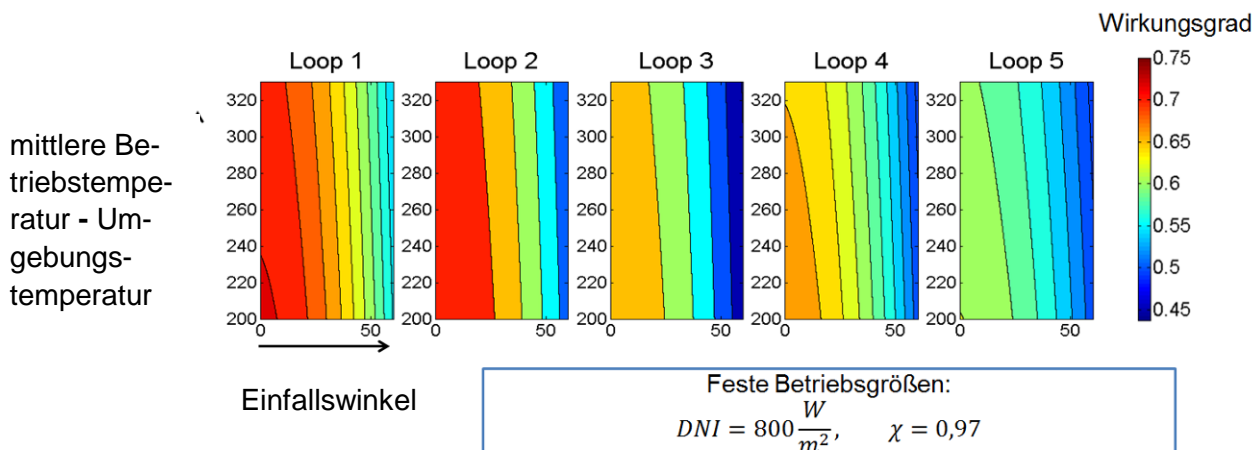
Zur Validierung des ermittelten Parametersatz wurde dieser an einen weiteren Messtag angewendet, welcher nicht zur Parameteridentifikation genutzt wurde (siehe Abbildung 20). Auch bei diesem, von den Parametern unabhängigen Messtag, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung im Verlauf der gemessenen und der über das PDPM berechneten thermischen Leistung. Es liegt eine Abweichung von 0,4% (bezogen auf die gemessene Leistung) bei der über die Zeit integrierten thermischen Leistung vor.



**Abbildung 20:** Gemessener und mittels PDPM berechneter Verlauf der thermischen Leistung Parabolrinnenkollektor-Loops für einen Messtag, der nicht zur Parameterermittlung genutzt wurde.

Im Vorhaben konnte das Solarfeldperformance-Modell und Auswerteroutinen auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten validiert und erweitert werden. Die Arbeit mit realen Loopdaten erlaubte eine Anpassung und Ergänzung der Modellierung zur besseren Berücksichtigung von im Solarfeld auftretenden Effekten wie Verschattung und unterschiedlicher Betriebs- und Regelstrategien zur Auswahl gültiger Daten für die Parameteridentifikation<sup>10</sup>. Dabei zeigten sich auch signifikante Abweichungen zwischen dem bisher angenommenem und dem tatsächlichen Solarfeldbetrieb insbesondere während der Nacht, die dazu führen, dass der Nachtbetrieb nicht immer sinnvoll für die Parameteridentifikation herangezogen werden kann.

Darüber hinaus erlaubte die umfangreiche Arbeit mit Kraftwerksdaten wertvolle Erkenntnisse bezüglich real im Solarfeld auftretender Probleme und Herausforderungen für Abnahmetests, die in der Guideline und aufbauenden Arbeiten adressiert werden. Insbesondere zeigte sich eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung von aus optischen und thermischen Messungen abgeleiteten Performanceeinschätzungen. Dies bestärkt das Vertrauen in die Aussagefähigkeit der thermischen Leistungsmessung. So bestätigen zum Beispiel die in Abbildung 21 dargestellten aus thermischen Messdaten ermittelten Wirkungsgradkennfelder, die ursprüngliche Hypothese, dass sich die baugleichen Loops eines der untersuchten Solarfelder stark in ihrer Leistungsfähigkeit unterscheiden. Diese Hypothese inklusive ähnlicher Tendenzen war im Vorfeld der Untersuchungen vom Industriepartner nach Auswertung der Messungen zur optischen Genauigkeit aufgestellt worden



**Abbildung 21:** Wirkungsgradkennfelder ausgewählter Kraftwerksloops in Abhängigkeit von der mittleren Systemtemperatur und Einfallswinkel

In Hinblick auf die Software entwicklungstechnische Qualitätssicherung wurde die entwickelten Routinen über die verschiedenen Anwendungsfälle einer gründlichen Überprüfung unterzogen. Weiterhin fand eine Integration in die Werkzeuge der DLR Solarforschung, inklusive Versionskontrolle, Bugtracking und Nachhaltung von (notwendigen) Entwicklungsschritten statt.

<sup>10</sup> N. Janotte, G. Feckler, J. Kötter, S. Decker, U. Herrmann, M. Schmitz, E. Lüpfert: Dynamic performance evaluation of the HeliTrough collector demonstration loop – towards a new benchmark in parabolic trough qualification. SolarPACES Las Vegas, 2013, Elsevier Energy Procedia

### **II.1.2.5. AP2.5 – Nationale und internationale Kooperation**

Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets wurden die derzeitigen internationalen Standardisierungsaktivitäten auf dem Gebiet der Solarfeld-Abnahmetests intensiv verfolgt, Beiträge geleistet und die laufenden Arbeiten mit verwandten Aktivitäten in anderen Projekten verknüpft.

Insbesondere wurden im Rahmen der SolarPACES guiSmo Aktivitäten (Task I) erste Richtlinien zur Solarfeldertragsprognose mitentworfen, die später im BMWi-Projekt CSPBankability mit dem Ziel der Schaffung von Methoden zur standardisierten Ertragsprognose von solarthermischen Kraftwerke konkreter ausgearbeitet wurden. In beiden Fällen wurden Projektergebnisse eingebracht und international bzw. national abgestimmt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Arbeiten bei SolarPACES Konferenzen im internationalen Rahmen vorgestellt und veröffentlicht.

Weiterhin wurden die Ergebnisse der Arbeiten aus AP2 mit denen des ISE aus AP1 abgestimmt und die Inhalte der gemeinsam erarbeiteten Best Practice Guideline zusammen mit den Ergebnissen der ausgewerteten Messkampagne auf der SolarPACES Konferenz 2015 in Kapstadt im Task I-Meeting vorgestellt und mit internationalen Experten aus Industrie und Forschung diskutiert.

Der ursprünglich geplante längere Austausch in USA zum Austausch mit NREL konnte mangels entsprechender Aktivitäten dort nicht sinnvoll realisiert werden.

Insgesamt wurden mit der Erarbeitung des Entwurfs einer BestPractice Guideline zur thermischen in-situ Vermessung von linienfokussierenden Kollektoren und Solarfeldabnahme, der Schaffung von Kalibrationskapazitäten und –routinen für Feldmesstechnik, dem Ausbau und der Demonstration des mobilen Feldlabors im Kraftwerk, sowie der Validierung der dynamischen Performance-Modellierung und Auswertung auf Loopebene die Ziele dieses Arbeitspakets weitestgehend erreicht. Im Einzelnen stellten sich die Arbeiten zur Charakterisierung und Kalibrierung des mobilen Feldlabors im Laufe des Vorhabens als aufwändiger dar als geplant, gleichzeitig war der Zugang zu Solarfeldern bestehender Parabolrinnen-Kraftwerke durch unerwartete politische und wirtschaftliche Entwicklungen stark erschwert. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt der Arbeiten wie in den Abschnitten II.1.2.2 bis II.1.2.4 im Einzelnen ausgeführt unter Berücksichtigung der Erreichung der Arbeitspaketziele entsprechend verschoben. Als Folge besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf dem Gebiet der nichtinvasiven Leistungsmessung größerer Solarfelder und der dynamischen Modellierung ihres Verhaltens.

### **II.1.3. AP3 – Methodenverbesserung zur Messung des gerichteten Reflexionsgrades von Solarspiegeln (DLR+ISE)**

Vor Projektbeginn herrschte am CSP Markt zum einen ein dringender Bedarf für eine standardisierte Messmethode zur Qualifizierung der Reflexionseigenschaften von solaren Spiegelmaterialien, und zum anderen ein ebenso dringender Bedarf für innovative Messinstrumente welche die geeignete Messung des gerichteten Reflexionsgrades ermöglichen. Nach dem Stand der Technik standen solche Messinstrumente nicht zur Verfügung. Ein erstes Dokument als Vorschlag für eine Messvorschrift war bereits vorhanden, allerdings mit der Erkenntnis, dass eine verbesserte Version benötigt wurde. Im Rahmen des Projekts ist es gelungen, eine neue Version der Messvorschrift als international anerkannte Vorschrift im Rahmen von Solar PACES als „*SolarPACES reflectance measurement guideline version 2.5 - Parameters and Method to evaluate the solar reflectance properties of reflector materials for concentrating solar power technology*“ zu veröffentlichen (M3.1 erreicht). Die Gültigkeit dieser Vorschrift, gerade für die Messung des spektralen hemisphärischen Reflexionsgrades, zeigte sich im durchgeführten Round Robin Test (AP 3.2.). Gute Übereinstimmung der Ergebnisse von 6 verschiedenen Laboren (darunter DLR und Fraunhofer ISE) wurden erzielt.

Nach Projektabschluss stehen nun außerdem sowohl beim DLR als auch beim Fraunhofer ISE fertig gestellte Prototypen von Messinstrumenten zur ausführlichen Analyse des gerichteten Reflexionsgrades zur Verfügung (siehe Abschnitt II.1.3.1). Vergleichsmessungen zwischen beiden Instrumenten zeigten eine weitgehend gute Übereinstimmung (siehe Abschnitt II.1.3.2). Die Verfügbarkeit dieser Instrumente ermöglichte es, weitergehende Untersuchungen an innovativen Solarspiegeln, welche nicht aus versilbertem Glas bestehen, durchzuführen und gerade für diese Spiegel noch besser geeignete Qualitätsparameter zu definieren (siehe Abschnitt II.1.3.3). Diese sollen unabhängig von diesem Projekt in einer zukünftigen, zweiten Messvorschrift für solche Materialien festgelegt werden.

#### **II.1.3.1. AP3.1 – Weiterentwicklung von Laborprototypen**

Beim DLR war bereits zu Projektbeginn ein Messprinzip entwickelt worden, um den gerichteten Reflexionsgrad als Funktion des Akzeptanzwinkels und in Abhängigkeit sowohl von Wellenlänge als auch Einfallswinkel zu messen. Der bereits vorhandene Prototyp MIRA des Instruments musste optimiert und validiert werden. Es wurden verschiedene optische Bauteile für verschiedene Kalibrierungs- und Ausrichtungs-Tests angeschafft. Erste Vergleiche mit einer externen, traditionell scannenden Goniophotometer-Messung an repräsentativen Spiegelproben zeigten noch signifikante Abweichungen gerade im Akzeptanzwinkelbereich  $< 10$  mrad. Daher wurde der Prototyp weiter optimiert durch den Einbau eines zweiten Schattenbandes und die Entwicklung von Korrekturfunktionen, welche die Instrumentensignatur und die Fertigungs-Ungenauigkeiten des Ellipsoiden ausgleichen. Ein erneuter Vergleich mit den externen Goniophotometer-Messdaten zeigte nun eine bessere Übereinstimmung, ebenso die Vergleichsmessungen mit dem ISE Prototypen VLABS (siehe Abschnitt II.1.3.2).



MIRA Spezifikationen:

- Winkelauflösung: 1.3 mrad (0.075°)
- Wellenlängenbereich:  $\lambda = 500 - 700 \text{ nm}$
- Wählbare  $\lambda$ -Bänder: 10 nm FWHM
- Einfallswinkel:  $\theta = 7 - 45^\circ$
- Messfleck Durchmesser: 3.5 mm
- Messunsicherheit: 3 – 5 % (aktuell)

Messung von vorder- & rückflächenverspiegelte Spiegeln bis einer Dicke von 4 mm.

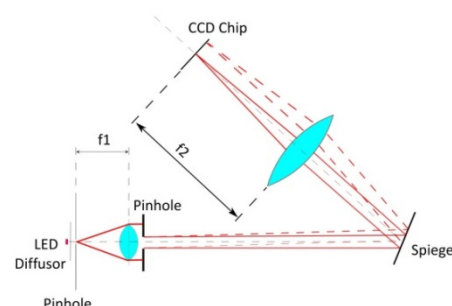
**Abbildung 22:** MIRA Messgerät zur winkel- und wellenlängenabhängigen Reflexionsgradmessung (links) und Spezifikationen (rechts)

Am Fraunhofer ISE wurde im Projekt ein Laborprototyp zur Messung des gerichteten Reflexionsgrades aufgebaut, VLABS (Very Low Angular Beam Spread). Eine schematische Zeichnung ist in Abbildung 23 zu sehen. Dazu wurden eine Kamera sowie optische Komponenten beschafft. Der Aufbau hat folgende Eigenschaften:

- LED Beleuchtung mit Wellenlängen 455 nm, 533 nm und 633 nm
- Strahldurchmesser auf der Probe von 0,6 bis 10 mm
- Einfallswinkel zwischen 8° und 80°
- Maximal erfassbarer Akzeptanzwinkel 33 mrad
- Winkelauflösung 0.05 mrad



Hellbild



Messbild

**Abbildung 23:** Schematischer Aufbau des VLABS Messinstruments<sup>11</sup>

<sup>11</sup> □ A. Heimsath, T. Schmid, P. Nitz (2015): Angle Resolved Specular Reflectance Measured with VLABS. In: Energy Procedia 69, S. 1895–1903.



Zur Ansteuerung des Messgeräts wurde ein LabView Programm erstellt, so dass eine schnelle und unkomplizierte Messdurchführung möglich ist. Weiter wurde eine Software zur Datenauswertung erstellt (AP 3.3). Die Analyse der Messunsicherheit des absoluten Wertes des gerichteten Reflexionsgrades ergab, dass für typische Spiegelmaterialien die Unsicherheit etwa 0,5% relativ beträgt. Die Vergleichbarkeit ähnlicher Spiegel sollte besser sein. Für Spiegel mit Mehrfachbeschichtung kann die Messunsicherheit leicht höher sein.

Mit VLABS sind nicht nur Vergleiche zwischen verschiedenen Spiegeln hinsichtlich ihrer herstellbedingten Oberflächenstreuung möglich. Auch verschmutzte und im Feld degradierte Spiegel können untersucht werden. Für die Erstellung von präzisen Ertragsprognosen hat sich vor allem die Möglichkeit als sehr wertvoll erwiesen, den Einfallswinkel über einen großen Bereich hinweg einstellen zu können.




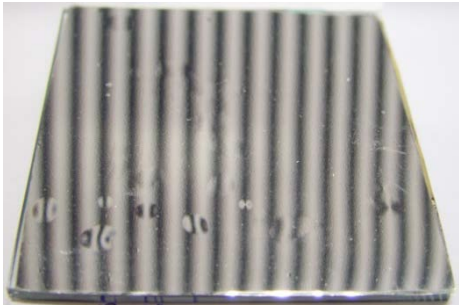
### **II.1.3.2. AP3.2 – Round Robin Test von Reflexionsmessgeräten**

Nicht nur unterschiedliche Instrumente, sondern auch unterschiedliche Messmethoden zur Ermittlung des gleichen Parameters können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Solche Fehlereinflüsse sollen durch geeignete Messvorschriften reduziert werden. Der Round Robin Test, welcher im Rahmen der SolarPACES Arbeitsgruppe Task III im Jahr 2013 durchgeführt wurde zeigte den Erfolg der unter anderem mit Hilfe diesen Projekts entstandenen Messvorschrift „*SolarPACES reflectance measurement guideline version 2.5 - Parameters and Method to evaluate the solar reflectance properties of reflector materials for concentrating solar power technology*“. Es wurden 10 unterschiedliche Reflektormaterialien von unterschiedlichen Herstellern in sechs Labors (darunter DLR und Fraunhofer ISE) untersucht. Gerade die Ergebnisse des solar gewichteten hemisphärischen Reflexionsgrades zeigten nur sehr geringe Abweichungen von < 0.45 %Punkten zwischen allen Teilnehmern.

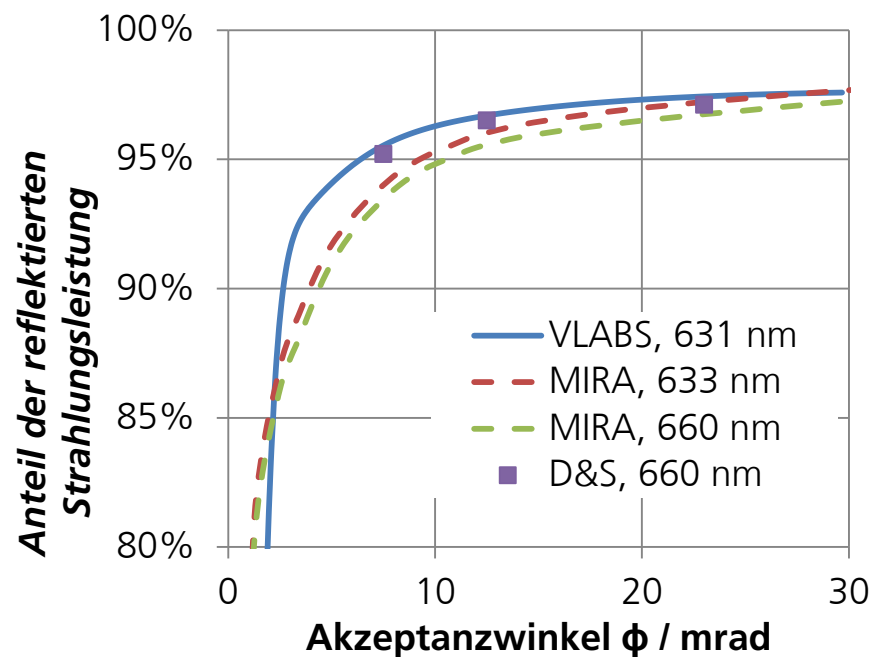
Für die Vergleichsmessungen zum gerichteten Reflexionsgrad zwischen VLABS und MIRA wurden insgesamt vier Proben ausgewählt. Fraunhofer ISE stellte zwei Proben aus dem SolarPACES Reflectance Round Robin Test von 2013 zur Verfügung (Aluminiumspiegel mit Schutzlack und rückseitenverspiegelter Glasspiegel), das DLR stellte eine Aluminiumprobe ohne Schutzlack und eine versilberte Polymerfilm Probe zur Verfügung.

Beim Glasspiegel erscheint das Streifenmuster verzerrungsfrei und relativ scharf, was auf eine sehr hohe Oberflächengüte hindeutet. Der Aluminiumspiegel mit Schutzlack lässt die Streifen etwas unschärfer erscheinen, was durch leichte Oberflächenrauheit zustande kommen kann. Bei dem Aluminiumspiegel ohne Schutzlack sind die Streifen vor allem an den Rändern verzerrt, was darauf hinweist, dass die Probe dort nicht plan ist. Auf dem Folienspiegel sind vor allem im Bereich links unten auf dem Foto deutlich Blasen zu erkennen, die durch das Aufkleben entstanden sein könnten.

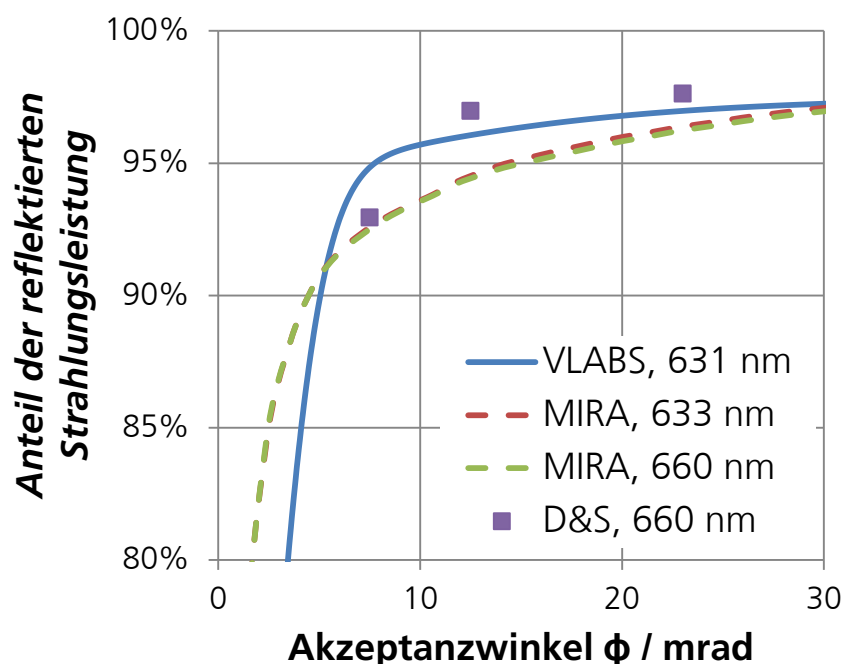
**Tabelle 3.** Übersicht über die bei der Vergleichsmessung zwischen MIRA und VLABS verwendeten Spiegel. Über die Spiegel wurde ein Streifenmuster zur orientierenden, qualitativen Bewertung der Oberflächengüte abfotografiert. Eine Inhomogenität des Reflexionsgrades über die Probenoberfläche lässt sich damit beispielsweise nicht erfassen.

<p>Rückseitenverspiegelter Glasspiegel</p> 	<p>Aluminiumspiegel mit Schutzlack</p> 
<p>Aluminiumspiegel ohne Schutzlack</p> 	<p>Versilberter Polymerfilmspiegel</p> 

Beide Instrumente konnten keine Strahlaufweitung am Glasspiegel auflösen, was den Erfahrungen aus dem SolarPACES Reflectance Round Robin entspricht. Die Ergebnisse der Aluminiumprobe ohne Schutzlack und der Polymerprobe stimmen gut überein, mit Abweichungen von weniger als 3 Prozentpunkten im Akzeptanzwinkelbereich  $> 5$  mrad. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 zu sehen. Sie zeigen, dass beide Geräte ihre Aufgabe trotz unterschiedlicher Verfahren erfüllen und prinzipiell als wertvolle, neue Alternative zur Verbesserung des Stand der Technik für die Messung des gerichteten Reflexionsgrads an innovativen Spiegelmaterialien zur Verfügung stehen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass für Spiegelmaterialien, die inhomogenere Reflexionseigenschaften, starke Interferenzen oder lokale Krümmungen aufweisen, eine Weiterentwicklung der Methoden erforderlich ist. Um auch für diese Spiegelmaterialien eine fundierte Methode zur Verfügung zu stellen, wird es als äußerst wichtig eingeschätzt diese weiterführenden Fragestellungen in einem Folgeprojekt zu bearbeiten. Im Rahmen der SolarPACES Task III wurde hierzu eine Arbeitsgruppe gegründet.



**Abbildung 24.** Anteil der reflektierten Strahlungsleistung aufgetragen über dem Akzeptanzwinkel für den Aluminiumspiegel ohne Schutzlack. Gemessen wurde mit dem DLR Prototypen MIRA, dem ISE Prototypen VLABS sowie dem kommerziell erhältlichen Gerät von D&S. Ab einem Akzeptanzwinkel von 5 mrad beträgt die Abweichung weniger als 2 Prozentpunkte.



**Abbildung 25.** Anteil der reflektierten Strahlungsleistung aufgetragen über dem Akzeptanzwinkel für den Polymerfilm Spiegel. Gemessen wurde mit dem DLR Prototypen MIRA, dem ISE Prototypen VLABS sowie dem kommerziell erhältlichen Gerät von D&S. Ab einem Akzeptanzwinkel von 5 mrad beträgt die Abweichung weniger als 3 Prozentpunkte.

Größere Abweichungen bestehen für die Aluminiumprobe mit Schutzlack. Dies kann zum einen von dem bereits leicht zerkratzten Zustand der Probe herrühren, als auch durch lokale

Variationen auf der Probe (insbesondere variable Interferenzen im spektralen Reflexionsgrad), da trotz aller Vorkehrungen nicht mit beiden Geräten an exakt derselben Stelle gemessen werden konnte.

Für Materialien mit geringer Streuung beschreibt die SolarPACES Guideline 2.5 eine vereinfachte Messmethode, die mit kommerziell erhältlichen Messgeräten anwendbar ist. Die Methode sieht die Messung des hemisphärischen Reflexionsgrades im gesamten Solarspektrum vor, sowie eine Kontrollmessung der gerichteten Reflexion bei einer Wellenlänge (üblicherweise 660 nm). Diese Methode hat sich für versilberte Glasspiegel bewährt, da die Strahlaufweitung der Materialien gering ist und (ab einem Akzeptanzwinkel von ca. 3 mrad) in guter Näherung angenommen werden kann, dass das gerichtete Reflexionsgradspektrum dem hemisphärischen gleicht. Wie unter anderem die hier vorgestellten Vergleichsmessungen zeigen, ist diese Annahme für alternative Reflektormaterialien wie mehrfach beschichtete Aluminiumspiegel oder versilberte Polymerfolien aufgrund der verstärkten Strahlaufweitung durch Oberflächenrauigkeit nicht mehr gerechtfertigt. Außerdem besteht eine Abhängigkeit des Reflexionsgrades vom Einfallswinkel und von der Wellenlänge, bedingt durch die Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten. DLR und ISE trugen aus diesem Grund innerhalb der SolarPACES Task III zu einer Version 3.0 der Guideline bei, in der spezifiziert wird, welche Kriterien die Materialien erfüllen müssen, um für die vereinfachte Messmethode zugelassen zu werden. Version 3.0 schließt demnach Materialien von der vereinfachten Prozedur aus, die starke Interferenzerscheinungen im hemisphärischen Reflexionsgradspektrum aufzeigen und solche, bei denen die Oberflächenstreuung einen großen Einfluss auf den gerichteten Reflexionsgrad hat. Die Version 3.0 der Guideline steht kurz vor der Veröffentlichung und wurde innerhalb eines Workshops und des Task III meetings vorgestellt.

### **II.1.3.3. AP3.3 – Theoretische Analyse und Simulation**

Um aus den Messdaten den gerichteten Reflexionsgrad zu bestimmen, muss berücksichtigt werden, dass in der Messung das auf die Probe einfallende Strahlbündel im Allgemeinen eine nicht vernachlässigbare Strahldivergenz aufweist. Auch optische Komponenten im Messaufbau liefern Beiträge zur Strahldivergenz, was zusammenfassend als Apparate-Signatur bezeichnet wird. Sie darf bei der Interpretation der Messdaten nicht als Lichtstreuung durch Oberflächenrauheit aufgefasst werden. Jede Messung der Streuwinkelverteilung (engl. angle resolved scattering, ARS) muss daher von diesem Einfluss korrigiert werden. Dies ist bei der Untersuchung der Nahwinkelstreuung, wie sie bei konzentrierenden Kollektoren relevant ist, besonders wichtig und bei kommerziell erhältlichen Geräten nicht Stand der Technik. Um eine möglichst für alle untersuchten Materialien funktionierende Korrekturroutine zur Verfügung zu haben, wurde von Fraunhofer ISE folgende empirische Modell-Funktion zur Darstellung der tatsächlichen Streuwinkelverteilung vorgeschlagen, die auf bereits veröffentlichten Voruntersuchungen zur Streuung von Solarspiegeln beruht<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> A. Heimsath, G. Kutscheidt, P. Nitz (2010): Detailed optical characterization of reflector materials for CSP applications, SolarPACES International Symposium 2010, Conference Proceedings.

$$\text{ARS}_{\text{emp}}(\varphi) = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{\sigma_1^2}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{\sigma_2^2}\right) + A_3 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\varphi^2}{\sigma_3^2}\right) + A_4 \cdot \exp(-\alpha \cdot \varphi)$$

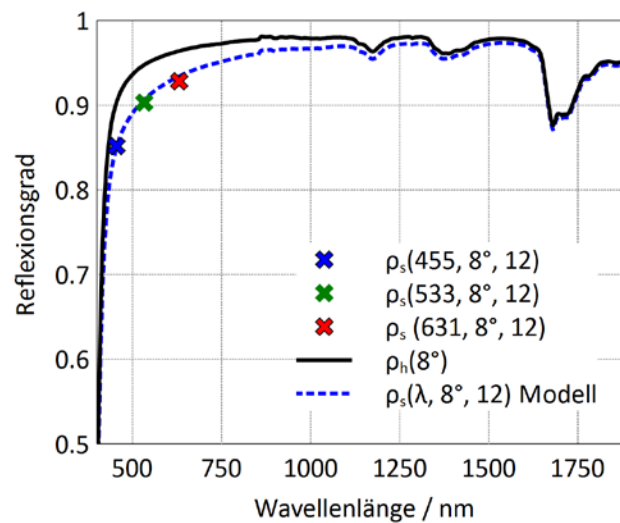
Diese Funktion beschreibt den monotonen Abfall der gestreuten Strahlungsleistung mit steigendem Streuwinkel. Die Streuwinkelverteilung besteht aus einer Summe mit vier Termen und enthält acht Parameter. Die ersten drei Terme beschreiben Beiträge mit einem gaußförmigen Verlauf, aber unterschiedlichen Streubreiten, entsprechend unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf verschiedenen Längenskalen. Der vierte Term beschreibt einen langsameren exponentiellen Abfall (Weitwinkelstreuung). Die acht Parameter werden über eine Anpassung der Faltung der Lichtquellensignatur mit der vorgestellten Funktion an die Messdaten ermittelt. Der gerichtete Reflexionsgrad wird dann über die Integration der Streuwinkelverteilung bis zu dem gewünschten Akzeptanzwinkel berechnet.

Diese von Fraunhofer ISE entwickelte Methode erwies sich für alle im Rahmen des Projektes untersuchten Proben als tauglich. Die Messdaten und damit die Reflexionseigenschaften der Proben konnten so miteinander verglichen werden. Hinsichtlich der Berechnung des solar gewichteten gerichteten Reflexionsgrades konnten so wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Für traditionelle Glasspiegel und Spiegel, die weder eine starke Oberflächenrauheit noch eine Mehrfachbeschichtung aufweisen, kann so der solar gewichtete gerichtete Reflexionsgrad aus den Messdaten hinreichend genau berechnet werden. Für Spiegel mit starker Oberflächenrauheit oder einer Mehrfachbeschichtung ist eine Extrapolation der Messdaten auf das gesamte solare Wellenlängenspektrum mittels geeigneter Modelle möglich. Einige Aluminiumspiegel beispielsweise weisen sowohl eine raue Oberfläche als auch eine Mehrfachbeschichtung auf. Um in einem solchen Fall den solar gewichteten gerichteten Reflexionsgrad bestimmen zu können, wurden erste Untersuchungen am Fraunhofer ISE durchgeführt. Der wellenlängenabhängige gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_s$  kann mittels einer Modellfunktion approximiert werden. Voraussetzung hierfür ist die Messung des gerichteten- und des hemisphärischen Reflexionsgrades an der gleichen Position auf der Probe und unter dem gleichen Einfallswinkel. Das auf der Streutheorie basierende Modell ermöglicht die Vorhersage des gerichteten Reflexionsgrades für jede Wellenlänge des Sonnenspektrums.

$$\rho_{s,\text{emp}}(\lambda, \theta_i, \varphi) = \rho_h(\lambda, \theta_i) \cdot \exp\left(-\left(\frac{4\pi\delta_s \cos\theta_i}{\lambda}\right)^2\right)$$

Der Term  $\delta_s$  wird empirisch aus Messungen bei mindestens drei Wellenlängen ermittelt und steht für die (effektive) relative Rauheit des Materialsystems bei einem bestimmten Akzeptanzwinkel. Die mit diesem Modell ermittelten solargewichteten gerichteten Reflexionsgrade bieten einen vielversprechenden Ansatz, der in zukünftigen Projekten verifiziert werden sollte. Die Anwendung des Modells auf die Vorhersage des gerichteten Reflexionsgrad für alle Wellenlängen des Solarspektrums ist in Abbildung 26 dargestellt. Beispielhaft wurden Messungen eines polymer-basierten Spiegels verwendet.





**Abbildung 26:** Vorhersage des gerichteten Reflexionsgrad über die Wellenlängen des Sonnenspektrums (Blaue Kurve). Für die Vorhersage werden Messungen des gerichteten Reflexionsgrades bei drei Wellenlängen und einem Akzeptanzwinkel verwendet (hier Messung bei blauem, grünem und rotem Licht, einem Einfallswinkel von  $8^\circ$  und  $12$  mrad Akzeptanzwinkel) und in Beziehung zum gemessenen hemisphärischen Reflexionsgrad gesetzt (schwarze Kurve).

## II.1.4. AP4 – Messtechnik für optische Eigenschaften von Absorberschichten (DLR+ISE)

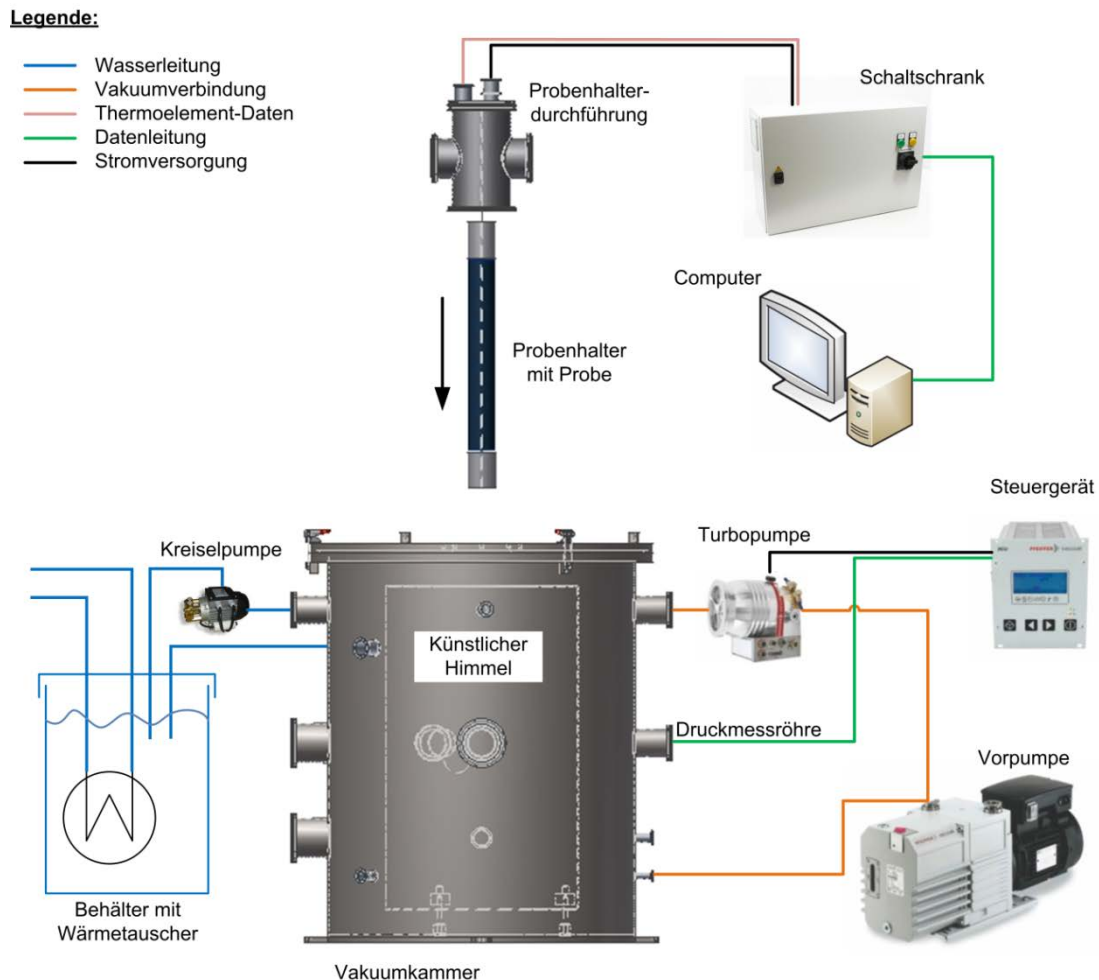
### II.1.4.1. AP4.1 – Thermisches Verfahren (DLR)

In diesem Arbeitspaket wurde ein Prüfstand zur Messung des hemisphärischen Gesamtemissionsgrads an zylindrischen Proben aufgebaut, der auf der stationär kalorimetrischen Methode basiert.

Der Emissionsgrad von Absorbern ist eine wichtige Messgröße in der Solartechnik, da der Emissionsgrad, zusammen mit der Oberflächentemperatur und der Fläche des Absorbers, die Höhe der Strahlungsverluste eines Receivers bestimmt. Ein niedriger Emissionsgrad der Absorber ist für nicht konzentrierende Systeme und für linear fokussierende Systeme, wie die Parabolrinnentechnologie oder Linearfresnelstechnologie, von entscheidender Bedeutung. Für die Solarturmtechnologie ist der Emissionsgrad der Absorber weniger zentral, dennoch können auch hier Wirkungsgradverbesserungen über niedrigere Emissionsgrade der Absorber erreicht werden.

Eine verbreitete Methode zur Messung des Emissionsgrades, die beispielsweise auch beim Fraunhofer ISE angewendet wird, ist die spektral aufgelöste Messung des Reflexionsgrads mit Photospektrometern. Aus dem gemessenen Reflexionsgrad kann im ersten Schritt auf den Absorptionsgrad und im zweiten Schritt auf den spektral aufgelösten Emissionsgrad geschlossen werden. Über die Gewichtung mit einem Planckspektrum einer bestimmten Temperatur kann der Gesamtemissionsgrad für diese Temperatur bestimmt werden. Vorteile der Methode sind, dass die Messung schnell durchführbar ist, und dass spektral aufgelöste Ergebnisse vorliegen, die Hinweise zu Optimierungsmöglichkeiten geben können. Allerdings sind die handelsüblichen Photospektrometer für die Messung flacher Proben konzipiert. Die Messung der in der Solartechnik üblichen rohrförmigen Proben ist daher nur mit zusätzlichem Aufwand und erhöhter Messunsicherheit möglich. Weiterhin wird die Probe meist bei Raumtemperatur vermessen, sodass eine mögliche Veränderung der spektralen Charakteristik bei höheren Temperaturen unberücksichtigt bleibt. Zudem wird in dieser Methode die Probe mit einer Referenzprobe verglichen. Daher ist die Messgenauigkeit prinzipiell begrenzt durch die Genauigkeit der externen Kalibration einer Referenzprobe.

Angeregt durch die in der Vermessung von Parabolrinnenreceiver verbreitete kalorimetrische Messung der Wärmeverlustleistung wurde daher in diesem Arbeitspaket ein Prüfstand zur Messung des Emissionsgrades an zylindrischen Absorberproben aufgebaut, der nach der stationär kalorimetrischen Methode arbeitet. Dabei wird eine Probe mit elektrischen Heizern auf eine Zieltemperatur erhitzt und stationär auf Zieltemperatur gehalten. Über die Aufstellung der Energiebilanz im stationären Zustand, bei der alle Heiz- und Verlustleistungen berücksichtigt werden, kann auf die Wärmeverluste durch Strahlung an der Probenoberfläche geschlossen werden. Dies erlaubt die Berechnung des mittleren hemisphärischen Gesamtemissionsgrades der Probenoberfläche. Vorteil der Messmethode gegenüber der Messung mit Photospektrometern ist, dass keine extern kalibrierten spektralen Referenzproben benötigt werden. Zudem wird die Probe bei der originalen Einsatztemperatur gemessen. Ein Schema des Prüfstands ist in Abbildung 27 gezeigt.



**Abbildung 27:** Schema des Aufbaus zur kalorimetrischen Messung des hemisphärischen Emissionsgrades von zylindrischen Proben.

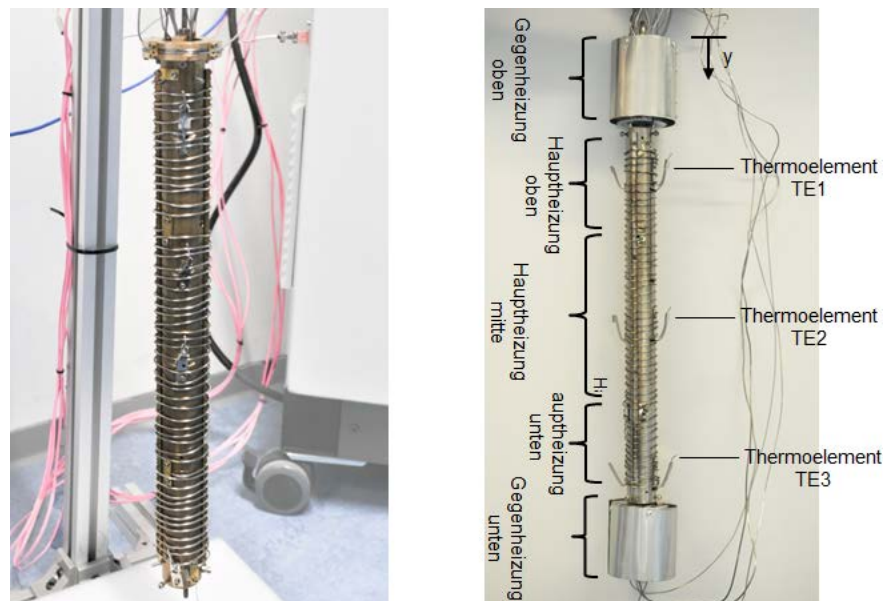
Eine rohrförmige Probe wird auf einen Probenhalter geschoben, der mit elektrischen Heizelementen und Thermoelementen ausgestattet ist. Dieser ermöglicht eine homogene Erwärmung der Probe und die Messung der Temperatur der Probeninnenseite an drei Stellen. Während der Messung des Emissionsgrades befindet sich die Probe in einer definierten Strahlungsumgebung, die durch den künstlichen Himmel erzeugt wird. Der künstliche Himmel ist ein zylindrisches Gefäß, das mit Wasser gekühlt und so gleichmäßig temperiert wird. Die innere Oberfläche des künstlichen Himmels ist mit Senotherm beschichtet, einem hoch emittierenden und hoch absorbierenden Lack. Dies sorgt dafür, dass die von der Probe emittierte Strahlung vom künstlichen Himmel absorbiert wird und nicht auf die Probe zurück reflektiert wird. Unterstützt wird der Effekt durch den diffusen Charakter der Beschichtung, dem großen Größenunterschied der Probe mit 7 cm Durchmesser und des künstlichen Himmels von 60 cm Durchmesser und der wabenförmigen Oberflächenstruktur der Wasserkühlung. Der gesamte Aufbau befindet sich zusätzlich in einer Hochvakuumkammer, siehe Abbildung 28. Der Druck in der Vakuumkammer während der Messung beträgt ca.  $10^{-6}$  mbar, wodurch Wärmeverluste über Gaswärmeleitung oder Konvektion an der Oberfläche der Probe vermieden werden. Dies erlaubt, dass lediglich Wärmeverluste über Strahlung und über Wärmeleitung in der Energiebilanz berücksichtigt werden müssen.



**Abbildung 28:** Vakuumkammer, Schaltschrank und Steuercomputer des Prüfstandes zur Messung des hemisphärischen Gesamtemissionsgrads von rohrförmigen Proben

Für die Messung wird die Probe über die Heizleiter am Probenhalter elektrisch auf die Zieltemperatur geheizt. Ist der Zustand einer konstanten Temperatur erreicht, so ist die Heizleistung gleich der Summe der Verlustleistungen, die im Wesentlichen durch die Strahlungsverlustleistung an der Oberfläche der Probe gegeben sind. Die Verlustleistung durch Wärmeleitung über die Zuleitungen und die mechanische Halterung wird über Näherungsformeln abgeschätzt. Über das Stefan-Boltzmann-Gesetz kann aus der Strahlungsverlustleistung an der Oberfläche der Probe der Emissionsgrad der Probenoberfläche berechnet werden.

Abbildung 29 zeigt die beiden realisierten Probenhalter ohne aufgeschobene Probe. Die Probenhalter sind konstruiert für Proben mit 50 cm Länge, 70 mm Außendurchmesser und 66 mm Innendurchmesser. Diese Maße sind geeignet für die Charakterisierung der Absorber von Parabolrinnenreceivern. Markiert sind im rechten Bild die Positionen der Thermoelemente und die fünf Heizzonen. Die Probe wird über drei unabhängig gesteuerte Heizer erwärmt, die eine gleichmäßige Temperatur der Proben in Längsrichtung sicherstellen. An den Enden der Proben befinden sich Gegenheizer, die auf die gleiche Temperatur wie die Probe geheizt werden und so einen Wärmeaustausch über die axialen Öffnungen der Proben vermeiden. Die wesentliche Weiterentwicklung von der ersten Version, siehe Abbildung 29 links, zur zweiten Version, siehe Abbildung 29 rechts, des Probenhalters, bestand im Übergang von Messing zu Edelstahl als Hauptmaterial. Messing besitzt den Vorteil einer hohen Wärmeleitfähigkeit, erwies sich jedoch als ungeeignet, da Bestandteile des Probehalters ausgasen und sich auf dem künstlichen Himmel abschieden. Zudem wurden beim zweiten Probenhalter die Gegenheizungen vergrößert, da sich die Gegenheizungen der ersten Version als zu flach erwiesen hatten. In einer letzten Modifikation des Probenhalters wurden die Zuleitungskabel thermisch an die Gegenheizer angekoppelt, um Wärmeverluste über die Zuleitungen zu vermeiden. Zudem wurden der Spalt zwischen Probe und Gegenheizer mit Isolationsmaterial gefüllt und die Gegenheizer besser thermisch isoliert, sodass Zieltemperaturen oberhalb 400 °C erreicht werden.

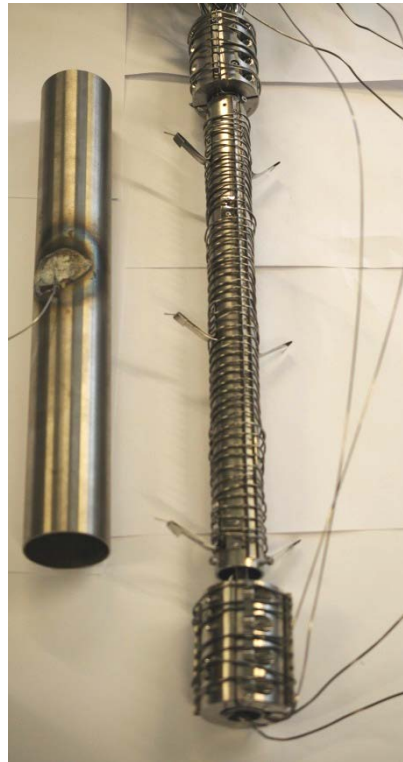


**Abbildung 29:** Probenhalter 2013 aus Messing (links), Probenhalter 2014 aus Edelstahl (rechts), die rohrförmige Probe wird von unten auf den Probenhalter aufgeschoben

Einen wesentlichen Beitrag zur Messunsicherheit des Emissionsgrades stellt die Unsicherheit der Messung der Probentemperatur dar. Die Temperaturmessung ist durch am Probenhalter befestigte Thermoelemente realisiert, die mit Federblechstreifen von innen an die Probe gedrückt werden, siehe Abbildung 29 (rechts). Allerdings werden diese Thermoelemente nicht nur durch die Probe, sondern auch durch die Strahlungstemperatur im Zwischenraum und durch Wärmeleitung der Kabel beeinflusst. Dieser Einfluss wurde vermessen und die Ergebnisse als Korrektur auf die Emissionsgradmessung angewendet. Dabei wird angenommen, dass der zu korrigierende Einfluss sowohl von der Heizleistung, als auch von der Temperatur der Probe abhängt. Zur Messung des Einflusses wird eine Kalibrierprobe aus Edelstahl mit außen aufgelöteten Thermoelementen, siehe Abbildung 30, mit dem Probenhalter vermessen und die innen und außen gemessenen Temperaturen verglichen. Die außen gemessene Temperatur wird als die wahre Oberflächentemperatur der Probe interpretiert, da die Temperatur der äußeren Oberfläche für die Strahlungsverluste relevant ist. In einer normalen Messung des Emissionsgrades einer beschichteten Probe ist diese Temperatur jedoch nicht messbar, da außen angebrachte Temperaturfühler den Emissionsvorgang beeinträchtigen würden. Lediglich bei der Messung mit der Kalibrierprobe ist diese Temperatur messbar. Die innen gemessene Temperatur ist sowohl bei der Messung einer beschichteten Probe, als auch bei der Messung der Kalibrierprobe zugänglich. Die innen gemessene Temperatur wird jedoch als systematisch zu hoch angesehen. Durch die Messungen mit der Kalibrierprobe können also Messungen mit beschichteten Proben korrigiert werden.

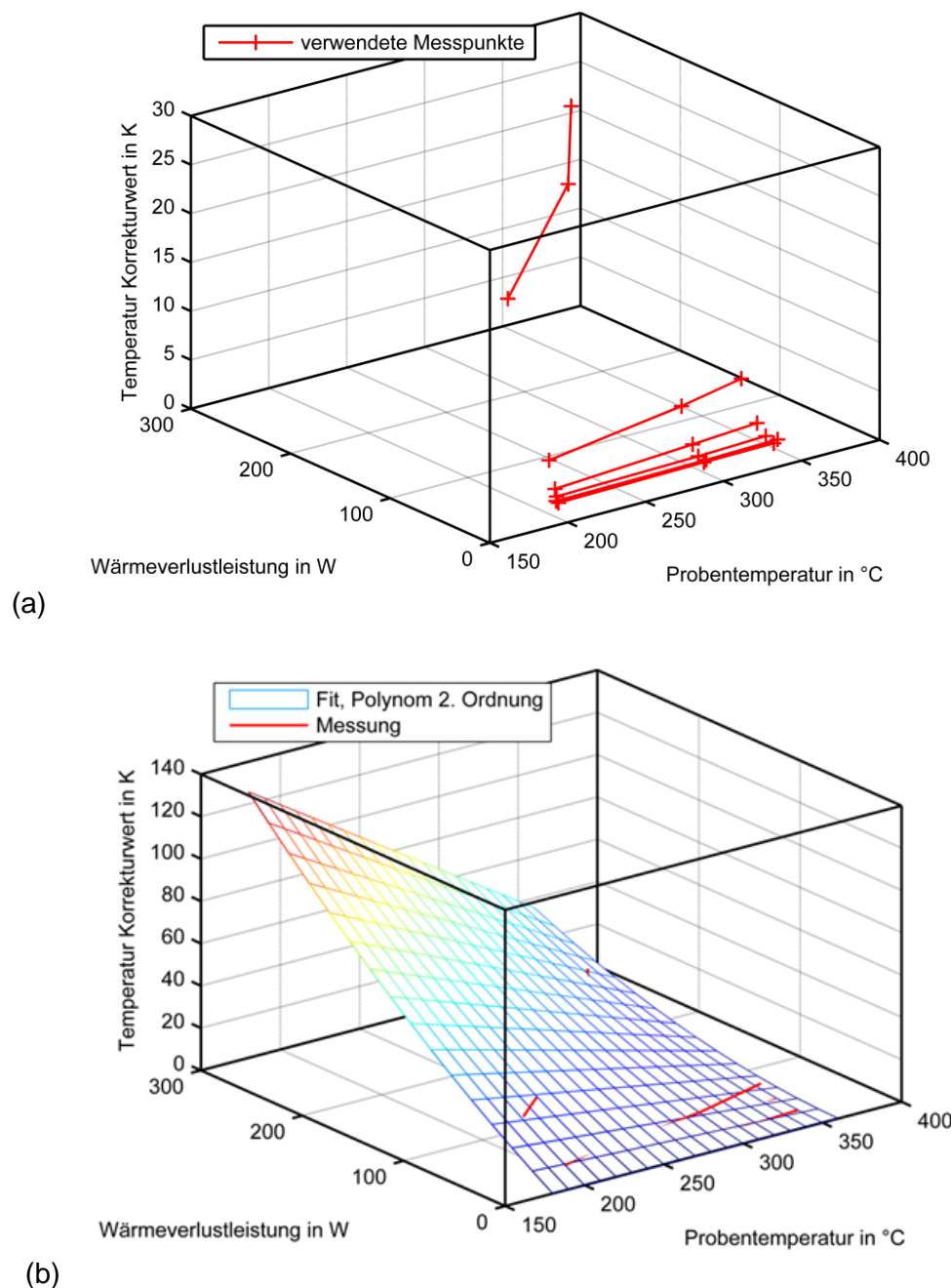
Um für die Kalibrierprobe unterschiedliche Wärmeverluste bei gleicher Temperatur des Rohres zu erreichen, wurden unterschiedlich dicke Wärmeisolationsschichten verwendet. Da für die systematischen Temperaturversatz an der Innenseite der Probe nur Prozesse innerhalb des Rohres verantwortlich sind, ist unerheblich, dass bei der Kalibrierprobe die Wärmeverluste durch Wärmeleitung durch eine Wärmeisolationsschicht, und nicht durch Strahlungsverluste an der Probenoberfläche bestimmt werden.





**Abbildung 30:** Kalibrierprobe mit aufgelötetem Thermoelement (links) und neuer Probenhalter aus Edelstahl (rechts) mit Thermoelementen, Heizleitern und fünf Heizzonen. Für die Messung der Temperaturkorrektur in Abbildung 31 wurde das Referenzrohr mit unterschiedlich dicker Wärmeisolation umwickelt

Das Ergebnis der Messungen der Kalibrierprobe ist in Abbildung 31a aufgetragen. Die Temperaturkorrektur wird bestimmt aus der Differenz der innen und außen gemessenen Temperaturen an der Kalibrierprobe als Funktion der Proben temperatur und der Wärme. Aus diesen Referenzmessungen wurde eine Interpolationsfunktion bestimmt, die die Korrektur für beliebig beschichtete Proben ermöglicht, siehe Abbildung 31b.



**Abbildung 31:** (a) Temperaturkorrektur in Abhängigkeit von Wärmeverlustleistung und der Proben-temperatur bestimmt über Messungen (b) aus den Messungen bestimmte Interpolationsfunktion der Temperaturkorrektur

Zur Überprüfung des Messsystems wurden drei Proben von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt. Diese Proben wurden beim DLR 2013, 2014 und 2016 entwicklungsunterstützend vermessen. Das ISE hat 2013 und 2016 die Proben mit einem Photospektrometersystem ebenfalls vermessen, um eventuelle Veränderungen an den Proben sichtbar zu machen und eine abschließende Vergleichsmessung 2016 zu ermöglichen.

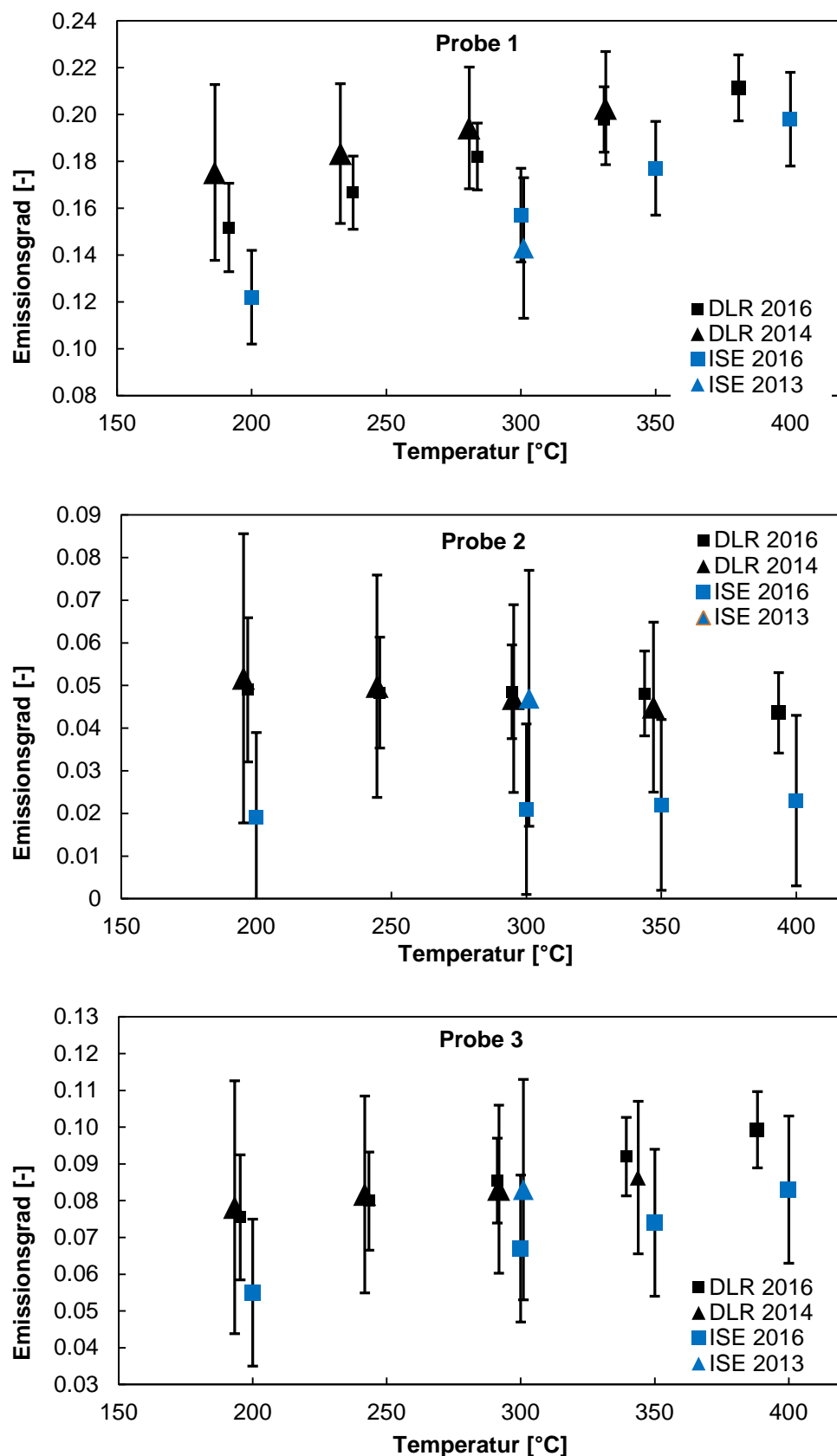
Abbildung 32 zeigt die Messergebnisse mit Ausnahme der frühen DLR Messung von 2013 für die noch keine Temperaturkorrektur durchgeführt wurde. Dargestellt ist der Emissionsgrad als

Funktion der Temperatur für die drei Proben. Die Proben repräsentieren typische Proben des vorgesehenen Anwendungsbereichs des Messsystems. Probe 1 repräsentiert eine hoch emittierende Schicht im Rahmen selektiver Absorberschichten für Vakuumanwendung mit gemessenen Emissionsgraden von 0.12 bis 0.22. Probe 2 repräsentiert eine niedrig emittierende Schicht mit gemessenen Emissionsgraden von 0.02 bis 0.05. Probe 3 repräsentiert eine typische solare Absorberschicht mit gemessenen Emissionsgraden von 0.06 bis 0.10.

Erkennbar in den Graphen ist für Probe 1 und Probe 3 eine deutliche Zunahme des Emissionsgrades mit zunehmender Temperatur. Bei Probe 2 zeigt sich beim spektraloptischen Verfahren eine nahezu gleichbleibende, mit den kalorimetrischen Verfahren eine leichte Abnahme des Emissionsgrades mit der Temperatur.

Beide Systeme weisen relativ hohe Unsicherheiten auf. Für die hoch emittierende Probe 1 liegen diese bei ca. 10% des Messwertes, bei der niedrig emittierenden Probe 2 bei bis zu 100%. Dies unterstreicht die Schwierigkeiten in der Entwicklung genauer Messsysteme für selektive Absorberschichten und damit die Notwendigkeit weiterer Entwicklungen.

Im abschließenden Vergleich der Messungen von 2016 stimmen die Messungen innerhalb der Fehlerbalken überein. Allerdings liegen die Messergebnisse der kalorimetrischen Messungen des DLR systematisch etwa 0.02 über den spektraloptischen Messungen des ISE. Diese Abweichung ist relativ unabhängig von Temperatur und Probenart. Daher bieten sich weitere Untersuchungen dieser Abweichungen an. Zudem bietet das kalorimetrische Messverfahren noch konkretes Potential zur Weiterentwicklung und Reduzierung der Messunsicherheiten. Bei einer Neukonstruktion des Probenhalters müssten der Spalt zwischen Gegenheizung und Probe von derzeit ca. 5 mm noch reduziert werden und der Wärmeaustausch über die mechanische Halterung der Probe weiter analysiert werden.



**Abbildung 32:** Gemessener Emissionsgrad von drei Proben, Messungen des DLR mit einem steady-state kalorimetrischen Messsystem, Messungen des ISE mit einem spektraloptischen Messsystem von 2013, 2014 und 2016, Fehlerbalken repräsentieren  $k=2$  Unsicherheiten

#### **II.1.4.2. AP4.2 – Spektraloptisches Verfahren (ISE)**

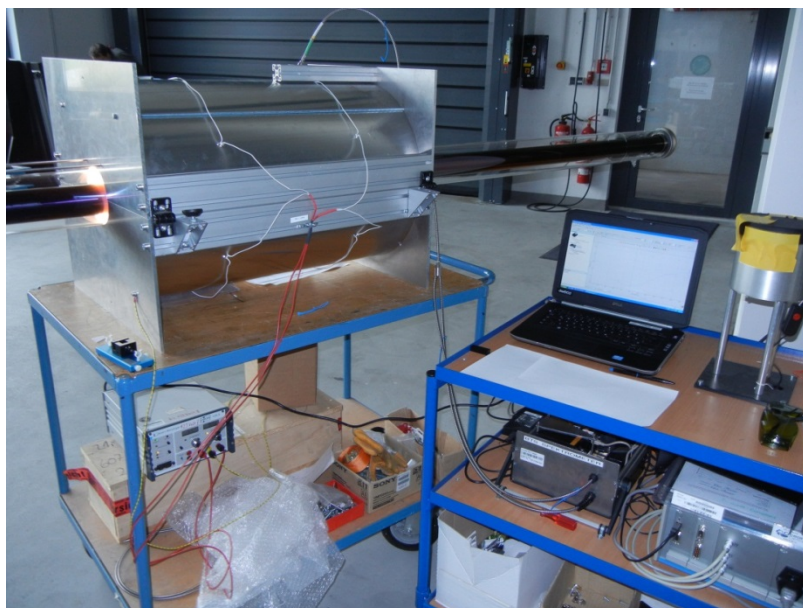
Ziel war die Entwicklung eines spektraloptischen Verfahrens, um die solaren Eigenschaften der Receiverkomponenten (Absorptionsgrad bzw. Transmissions-Absorptions-Produkt) zerstörungsfrei und verlässlich am Produkt messen zu können.

Hierzu wurde ein integrierender Zylinder gefertigt. Abbildung 33 zeigt die Beschichtung der Innenseite mit einem diffus hoch reflektierenden Material. Dieser integrierende Zylinder wurde weiter mit Lichtquellen (Halogenlampen), Detektor und einem Spektrometer ausgestattet.



**Abbildung 33:** Beschichtung der Innenseite des integrierenden Zylinders

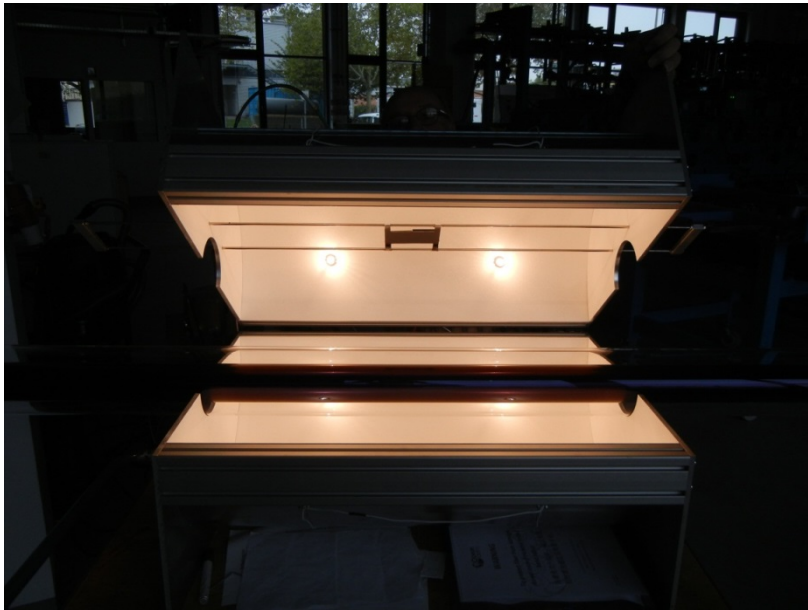
Abbildung 33 zeigt die gesamte Messvorrichtung mit einem Receiver in dem integrierenden Zylinder, Spannungsversorgung für die Lampen, Spektrometer und Rechner.



**Abbildung 34:** Messvorrichtung mit Receiver in integrierendem Zylinder und Spektrometer

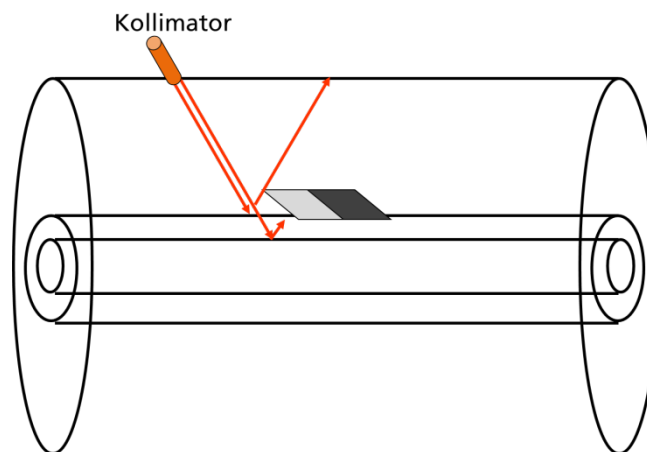


Abbildung 35 zeigt den integrierenden Zylinder halb geöffnet. Man erkennt die Lampen, das Receiver-Rohr, aber auch einen Schieber, der auf der Unterseite absorbierend, auf der Oberseite teils reflektierend und teils absorbierend beschichtet ist. Das Verstellen der Position des Schiebers ermöglicht das Aufnehmen unterschiedlicher Spektren (Hellreferenz, Dunkelreferenz, Trennen der Reflexe von Glashüllrohr und Absorber-Stahlrohr), die dann zusammen mit an einem anderen Spektrometer vermessenen Spektren der unterschiedlichen Seiten des Schiebers zu dem Reflexions-Spektrum des Absorberrohrs verrechnet werden können.



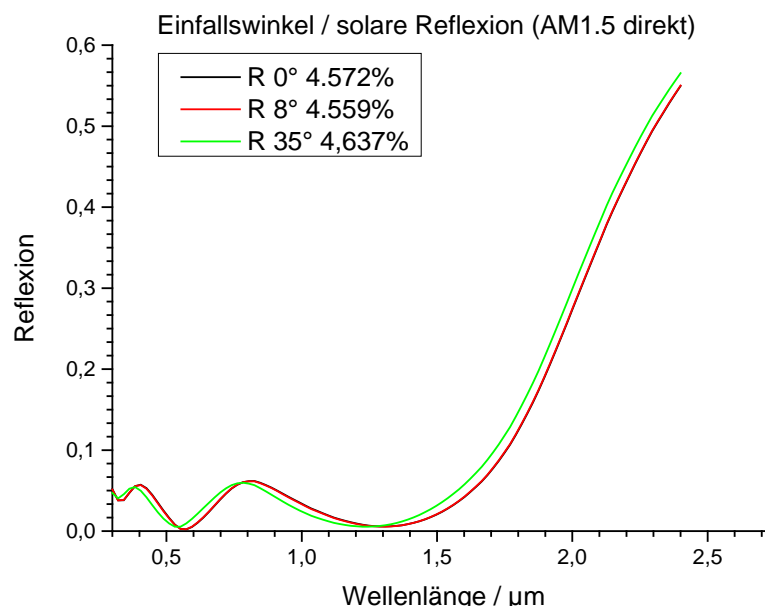
**Abbildung 35:** Integrierender Zylinder mit Receiver (halb geöffnet)

Eine der Schieberpositionen ist in der folgenden Grafik dargestellt (Abbildung 36). Der integrierende Zylinder ist über einen auf einen Kollimator aufgesetzten Lichtleiter mit dem Spektrometer verbunden. In dieser Schieberposition wird der Strahlengang zwischen Kollimator, Reflexion am absorbierenden Stahlrohr und integrierende Zylinderwand vom Schieber blockiert, nicht aber der entsprechend am Glashüllrohr reflektierte Strahl. Dadurch können diese beiden Reflexionen getrennt werden. Weitere Schieberpositionen sind: ganz am Rand (Reflexion von Glasrohr und Stahlrohr), Kollimator ist ganz auf die reflektierende Oberseite des Schiebers gerichtet (Hellreferenz) und Kollimator ist ganz auf die absorbierende Oberseite des Schiebers gerichtet (Dunkelreferenz). Es hat sich jedoch herausgestellt, dass es günstiger ist, eine Hellreferenz aufzunehmen, in dem man eine spiegelnde Aluminiumfolie auf das Glasrohr legt (mit der entsprechenden Krümmung), und zur Referenzierung plan in einem anderen Spektrometer vermisst.



**Abbildung 36:** Schematische Darstellung der Schieberposition im integrierenden Zylinder

Bei dieser Messanordnung wird die Reflexion mit einem Einfallswinkel von  $30^\circ$  gemessen, um die an Glasrohr und Stahlrohr reflektierten Strahlen trennen zu können. Dies hat jedoch im Vergleich zu einem senkrechten Einfall keine besondere Relevanz, wie Simulationsrechnungen an einer typischen selektiven Absorberschicht bestätigen (Abbildung 37). Die Simulationsrechnungen zeigen ein nahezu identisches Ergebnis für  $8^\circ$  und  $0^\circ$ . Die Referenzmessungen an einem Fourierspektrometer wurden unter  $8^\circ$  aufgenommen. Durch die Zylinderform des Stahlrohres und die endliche Kollimation ist der mittlere Einfallswinkel nicht  $30^\circ$ , wie für den mittleren Strahl, sondern  $35^\circ$ .

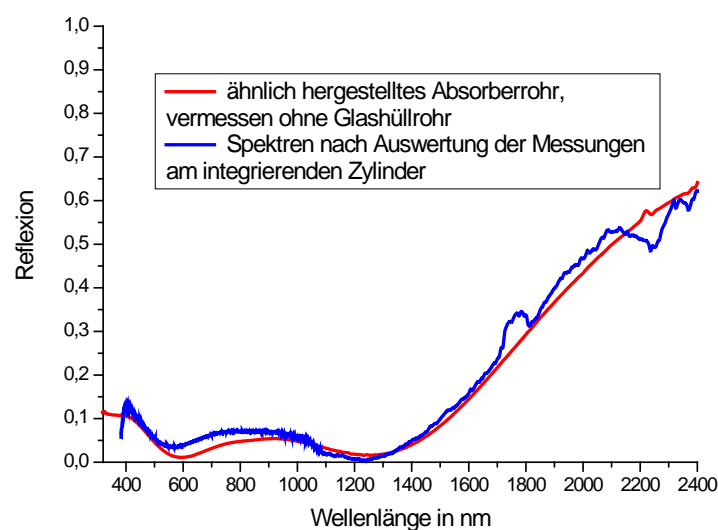


**Abbildung 37:** simulierte Spektren einer typischen selektiven Absorberschicht in Abhängigkeit des Einfallswinkels

Abbildung 38 zeigt zwei Reflexionsspektren. Zum einen wurde ein mit einer Absorberschicht beschichtetes Stahlrohr mit einem Fourierspektrometer vermessen (ohne Glashüllrohr, rote Kurve). Zum anderen wurde ein auf ähnliche Weise hergestelltes Absorberrohr in einem Glashüllrohr im integrierenden Zylinder vermessen. Man erkennt eine gute Übereinstimmung. Die

unterschiedliche Lage der Interferenzminima ist durch leicht unterschiedliche Herstellungsbedingungen der beiden Absorberschichten begründet. Unterhalb von 400 nm bricht das Spektrum des integrierenden Zylinders ein. Hier wurde noch ein Silberspiegel als Referenz verwendet (Hellreferenz auf dem Schieber). Die Verwendung eines Aluminium-Spiegels (Folie auf Glas-hüllrohr) brachte jedoch trotz dessen höheren Reflexionsgrads im Bereich der ultravioletten Strahlung keine deutliche Verbesserung. Das Problem ist vermutlich eher die schwache Intensität der verwendeten Halogenlampen in diesem Spektralbereich.

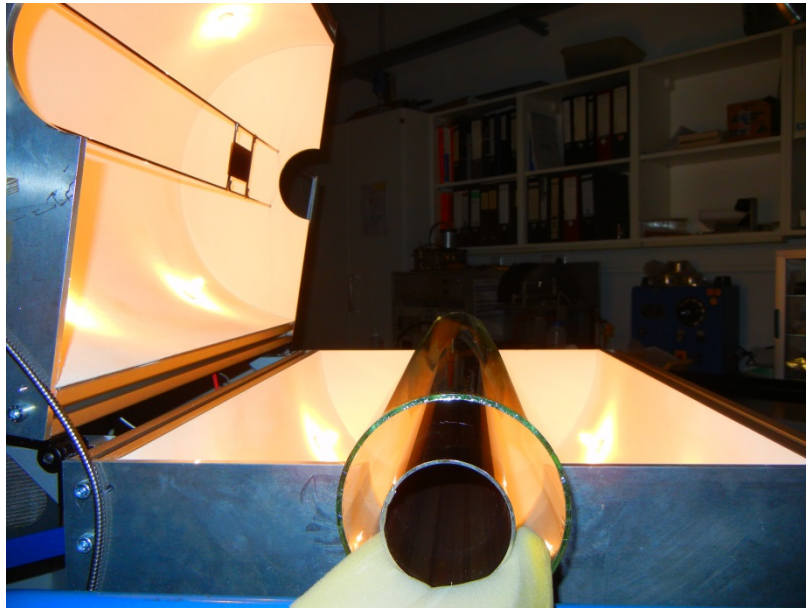
Im nahen Infraroten ist ein starkes Rauschen zu beobachten. Es liegt an der geringen Intensität der Halogenlampen und der geringen Empfindlichkeit des verwendeten GaAs Detektors und kann durch längere Messzeiten nur graduell zu verbessert werden. Für die solare Absorption ist dieser Spektralbereich jedoch nicht besonders relevant.



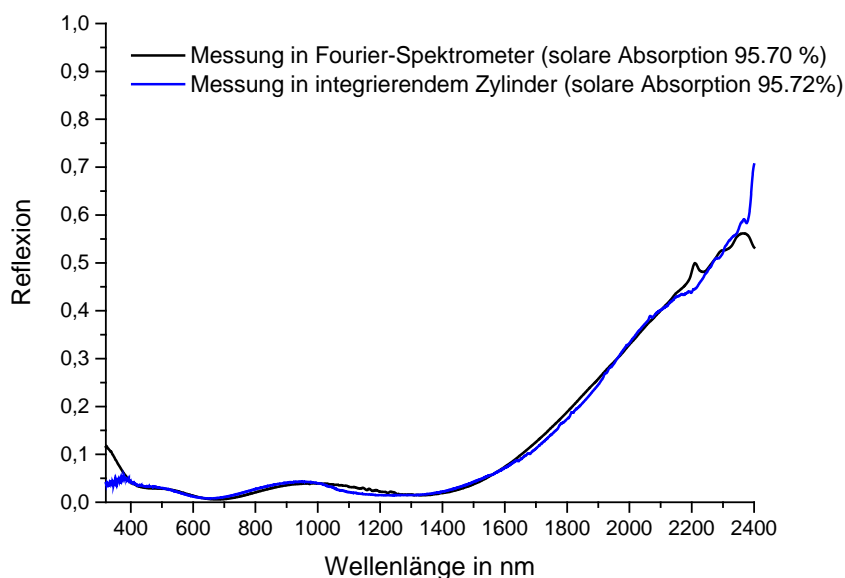
**Abbildung 38:** Reflexionsspektren eines Absorberrohrs in einem Receiver gemessen im integrierenden Zylinder, und eines ähnlich hergestellten Absorberrohrs gemessen ohne Glasrohr an einem Fourier-Spektrometer

Zur besseren Überprüfung der Methode wurden Absorberrohre und Glasrohre lose zusammengesteckt (Abbildung 39) und in dem integrierenden Zylinder vermessen. Hier konnte das Stahlrohr auch separat (ohne Glashüllrohr) an einem Fourierspektrometer vermessen werden. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 40). Der Vergleich an unterschiedlichen Absorberrohren und wiederholte Messungen an dem gleichen Rohr zeigten ebenfalls befriedigende Ergebnisse.

Der hier beschriebene Aufbau wurde später auch in einem Round-Robin-Versuch des europäischen Fördervorhabens „Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy“, kurz STAGE-STE, FP7 grant agreement number 609837, eingesetzt.



**Abbildung 39:** Glasrohr und Stahlrohr lose zusammengesteckt in dem integrierenden Zylinder



**Abbildung 40:** Reflexionsspektren eines Absorberrohrs gemessen an einem Fourierspektrometer und im integrierenden Zylinder mit Glasrohr

#### II.1.4.3. AP4.3 – Standardisierung

Im Arbeitspaket wurde eine gemeinsame Prüfvorschrift mit dem Titel „GUIDELINES FOR THE LABORATORY MEASUREMENT OF EMITTANCE ON CYLINDRICAL SAMPLES“ erstellt. Es ist vorgesehen, die Inhalte in die internationalen Standardisierungsaktivitäten organisiert durch SolarPACES einzubringen.

### **II.1.5. AP5 – Formtreuemessung an Konzentratorspiegeln (DLR+ISE)**

Eine hohe Formtreue und geringe Steigungsabweichungen der Konzentratorspiegel tragen wesentlich zur optischen Effizienz von Kollektoren in solarthermischen Kraftwerken bei. Zur Vermessung der Formtreue von Spiegeln für die konzentrierende Solartechnik wurden im Laufe der letzten Jahre unabhängig voneinander von verschiedenen Forschungseinrichtungen Methoden entwickelt, die sich seit einigen Jahren zur Bewertung der Spiegelformqualität bewährt haben.

Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Formtreuemessung von Konzentratorspiegeln bei den verschiedenen internationalen Forschungsinstituten: Die am DLR entwickelten Verfahren zur Formtreuemessung von Konzentratorspiegeln werden seit einigen Jahren sowohl im Labor (Deflektometrie) als auch im Feld (Fotogrammetrie, Absorberrohr-Reflexionsmethode) eingesetzt. Das am ISE entwickelte Verfahren der Streifendeflektometrie wird für die Vermessung verschiedener Spiegelgeometrien im Labor und im Solarfeld verwendet.

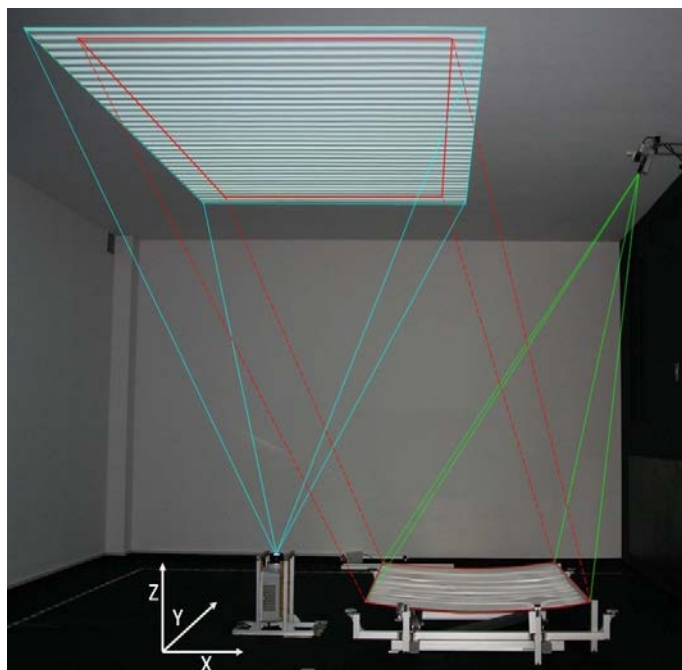
Drei wesentliche Schritte auf dem Weg zu einer standardisierten Messprozedur wurden im Rahmen des StaMeP-Projektes realisiert: Als erstes wurden die unterschiedlichen Verfahren des DLR und des ISE für die Formtreuemessung von Konzentratorspiegeln im Labor beschrieben. Vergleichsmessungen ebener Referenzflächen haben die hohe Genauigkeit beider Verfahren im Winkelbereich von Zehnteln von Milliradian bestätigt (das entspricht Steigungen von 0,1 mm pro Meter). Des Weiteren wurde ein Dokument erarbeitet, das die relevanten Qualitätsparameter definiert und wichtige Hinweise zur Messdurchführung, Auswertung und Messgenauigkeit zusammenfasst. Dieser Normungsvorschlag wurde dem Fachpublikum im Rahmen der IEA SolarPACES-Task III zur Verfügung gestellt. Schließlich wurde eine Round-Robin-Vergleichsmessung zwischen dem DLR, dem ISE und zwei weiteren Partnern der IEA SolarPACES-Task III durchgeführt.

Unterschiede bei der Auswertung der Solarspiegel im internationalen Round Robin legen eine weitergehende Normierung der Auswerteverfahren nahe. Diese sollen unabhängig von diesem Projekt in einer zukünftigen, zweiten Messvorschrift erarbeitet werden. Eine Verifizierung mit anderen kamera-basierten oder taktilen Messverfahren könnten ebenfalls Gegenstand weiterer Forschungsvorhaben sein.

#### **II.1.5.1. AP5.1 – Beschreibung der Verfahren**

Sowohl am Fraunhofer ISE als auch am DLR wird die Formtreue von Konzentratorspiegeln mittels Deflektometrie vermessen. Die Deflektometrie ist ein phasenschiebendes Messverfahren zur Charakterisierung von spiegelnden Objekten. Auf eine matt-weiße Fläche wird ein sinusoidales Muster von schwarzweißen Streifen projiziert. Dieses Muster wird von der Oberfläche des spiegelnden Messobjekts reflektiert und von der Messeinheit, einer Kamera, aufgenommen, siehe Abbildung 41 (links).



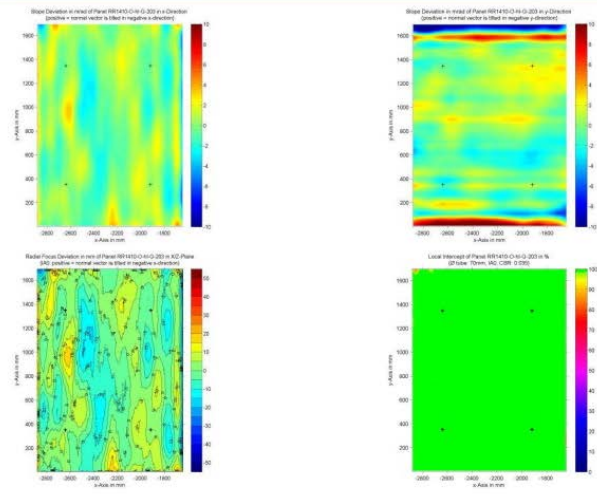


**Abbildung 41:** Prinzip der deflektometrischen Vermessung eines Parabolrinnen-Spiegels, Laboraufbau am Fraunhofer ISE (links), Beschreibung der Formtreuevermessung von Konzentratorspiegeln (rechts)

Die deflektometrische Vermessung und Bewertung von Spiegeln gliedert sich in mehrere Schritte. Das Schema in Abbildung 42 (rechts) zeigt wichtige Teilaspekte der Methode. Erster Schritt nach dem Aufbau ist die Kalibrierung des Messsystems, die Korrekturfunktionen für Kamera und Projektor und die geometrische Orientierung umfasst. Zur Überprüfung der Kalibrierung wird eine Wasserfläche vermessen. Vor der Messung ist die definierte Probenhalterung und Ausrichtung ein wichtiger Aspekt. Gerade bei Spiegel-Segmenten mit Glas als tragendem Element hängt das Ergebnis der Messung stark von der Halterung der Proben ab<sup>13</sup>. Kern der Spiegelcharakterisierung ist die deflektometrische Messung selbst, bei der eine Serie sinusoidaler Muster mit der Kamera aufgenommen werden um dann die Oberflächengradienten und die lateralen Koordinaten zu berechnen. Sie werden durch Integration der Oberfläche erzeugt, ausgehend von einer definierten Messebene<sup>14</sup>. Letzter Schritt ist der Vergleich der gemessenen Oberfläche mit der idealen Form. Hierfür ist eine Transformation der gemessenen Daten notwendig. Schließlich werden die lokalen Steigungsabweichungen und die SDx- und FDx- Werte als Kennzahlen berechnet. In Abbildung 42 ist beispielhaft eine typische Zusammenfassung der Ergebnisse einer Formtreuemessung im DLR dargestellt.

- <sup>13</sup> S. Meiser, E. Lüpfert, B. Schiricke, R. Pitz-Paal (2014) Analysis of parabolic trough concentrator mirror shape accuracy in different measurement setups. Energy Procedia (49), Seiten 2135-2144
- <sup>14</sup> A. Heimsath, W.J. Platzer, T. Bohte, W. Li, Characterization of optical components for linear Fresnel collectors by fringe reflection method , Proceedings of Solar Paces 2008

### QDec Measurement Summary

Measurement Information			
<b>Panel:</b>	RR1410-O-hl-G-203	<b>Meas. Date:</b>	10.11.2014 - 17:43:26
<b>Paneltype:</b>	RP3 outer - glass	<b>Operator:</b>	DLR
<b>Setup:</b>	Horizontal_loose	<b>Comment:</b>	_1
<b>Negl. Rim:</b>	5 mm	<b>System:</b>	QDec DLR Cologne
<b>Orientation:</b>	On Mounting Points	<b>Location:</b>	QUARZ Center Cologne
Result Overview			
<b>Quality:</b>	no specifications      Evaluated Surface: 98.6 %		
Value	Measurement	Specification	Description
SDx	1.30 mrad		Slope deviation in x-direction (rms)
SDy	2.79 mrad		Slope deviation in y-direction (rms)
FDx	6.40 mm		Focus deviation in x-direction (rms)
FDy	9.56 mm		Focus deviation in y-direction (rms)
IC70	100.00 %		Intercept laser on tube of 70mm
IC60	99.97 %		Intercept laser on tube of 60mm
IC40	99.52 %		Intercept laser on tube of 40mm
ICsun70	98.86 %		Intercept sun on tube of 70mm
Result Graphs			
			
Measurement System Information			
Config File:	ConfigFile_Rp3_outer_140325		
Evaluation Date:	10.11.2014 - 16:42:10		
Last Calibration:	-		
PDF Filename:	...\\Output_RR1410-O-hl-G-203_1\\RR1410-O-hl-G-203_Rim5_MP_Result_141110164210.pdf		
		QDec Version:	3.1.3634 (27.03.2014)

**Abbildung 42:** Zusammenfassung der Messergebnisse (DLR) für Spiegel „203“

In der Richtlinie „MirrorShape-Guideline“, die der SolarPACES Task III Working Group als Vorschlag vorgelegt wurde, werden die derzeit verfügbaren üblichen Verfahren zur Formtreuemessung grundlegend beschrieben. Detailliertere Dokumentationen wie Checklisten zur Messdurchführung oder Dokumentationen und Programmcodes der Auswertesoftware wurden im Laufe des Projektes überarbeitet und erweitert. Sie sind als interne Dokumente in den beiden Forschungsinstituten in Diskussion für die Einbindung in die Guideline. Weitere Erläuterungen zu den Messverfahren finden sich im Literaturverzeichnis der Richtlinie (MirrorShape-Guideline).

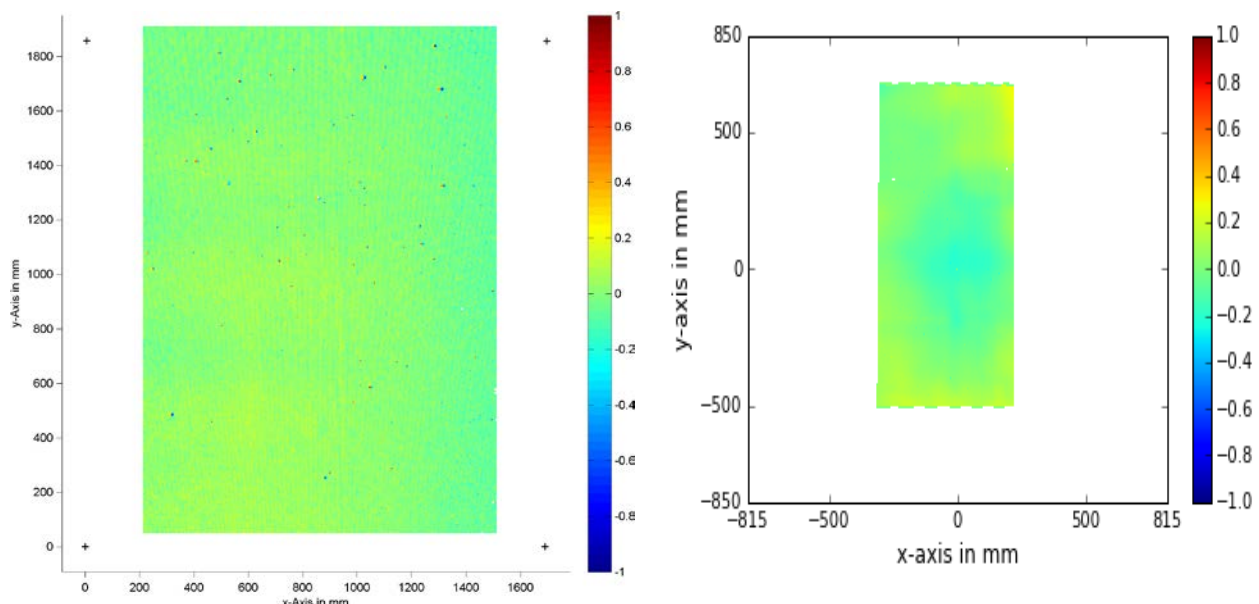
#### II.1.5.2. AP5.2 – Round-Robin Vergleichsmessung mit internationalen Partnern

Ziel eines Vergleichs zwischen verschiedenen Messmethoden und Labors ist es, übereinstimmende Ergebnisse zur Validierung der Messungen und Methoden zu erhalten. Dazu wurden Proben von Labor zu Labor versendet um die Ergebnisse zwischen DLR QUARZ-Zentrum und

Fraunhofer ISE zu vergleichen. Nicht nur unterschiedliche Instrumente, sondern auch unterschiedliche Probenhalterung, Messmethoden und Auswertevorschriften zur Ermittlung des gleichen Parameters können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Solche Fehlereinflüsse werden identifiziert und durch geeignete Messvorschriften reduziert. Um mögliche Unterschiede zu identifizieren, wurden repräsentative Spiegelproben des Typs RP3 für Parabolrinnen-Kollektoren (EuroTrough) mit den in AP 5.1 beschriebenen Messtechniken in einer Round-Robin-Vergleichsmessung mit internationalen Partnern der SolarPACES Task III untersucht.

Zwischen Fraunhofer ISE und DLR wurden die Randbedingungen der Messdurchführung, insbesondere die Orientierung und Lagerung der Spiegelproben und die Auswahl der Spiegelproben abgestimmt. Da die Lagerung der Spiegel einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis hat, wurde vom DLR ein Halterahmen für die Messung der Spiegel gefertigt und für die Round-Robin-Vergleichsmessungen zur Verfügung gestellt. Er dient zur reproduzierbaren Befestigung der Spiegel an den unterschiedlichen Orten der Messungen. In einer detaillierten Messanleitung, die vom DLR ausgearbeitet wurde, werden die einzelnen Schritte von der Vorbereitung bis zur Auswertung der Messung den Round-Robin-Teilnehmern beschrieben.

Für den Vergleichstest wurden vier äußere Spiegel von Parabolrinnen-Kollektoren der RP3-Geometrie ausgewählt und in den Laboren des DLR und des Fraunhofer ISE auf dem präzise ausgerichteten Rahmen in horizontaler Lage (horizontal ausgerichtete Befestigungspunkte) gemessen. Aus den gemessenen Oberflächensteigungen wurden die lokalen Steigungsabweichungen für die ideale Position des Spiegels im Kollektor bestimmt. Die Messergebnisse von DLR und Fraunhofer-ISE wurden systematisch verglichen und die auftretenden Unterschiede diskutiert. Ein wesentlicher Schritt beinhaltete die Überprüfung der Genauigkeit der Messsysteme anhand der Vermessung einer Wasseroberfläche. Die Ergebnisse der Wasseroberflächenmessung zeigen Genauigkeiten von besser als 0.1 mrad (DLR, über die Messfläche von 2,5 m<sup>2</sup>) bzw. 0.2 mrad (Fh-ISE, über eine kleinere Teilfläche) im quadratischen Mittelwert der Steigungsabweichung in Spiegelkrümmungsrichtung (Abbildung 43).



**Abbildung 43:** Steigungsabweichung einer Wasseroberfläche in mrad als Referenzmessung, links DLR; rechts Fh-ISE,

Zusätzlich wurden dieselben Spiegel und der präzise Halterahmen außerdem zwei weiteren europäischen Labors zur Verfügung gestellt, die in SolarPACES Task III kooperieren, dem

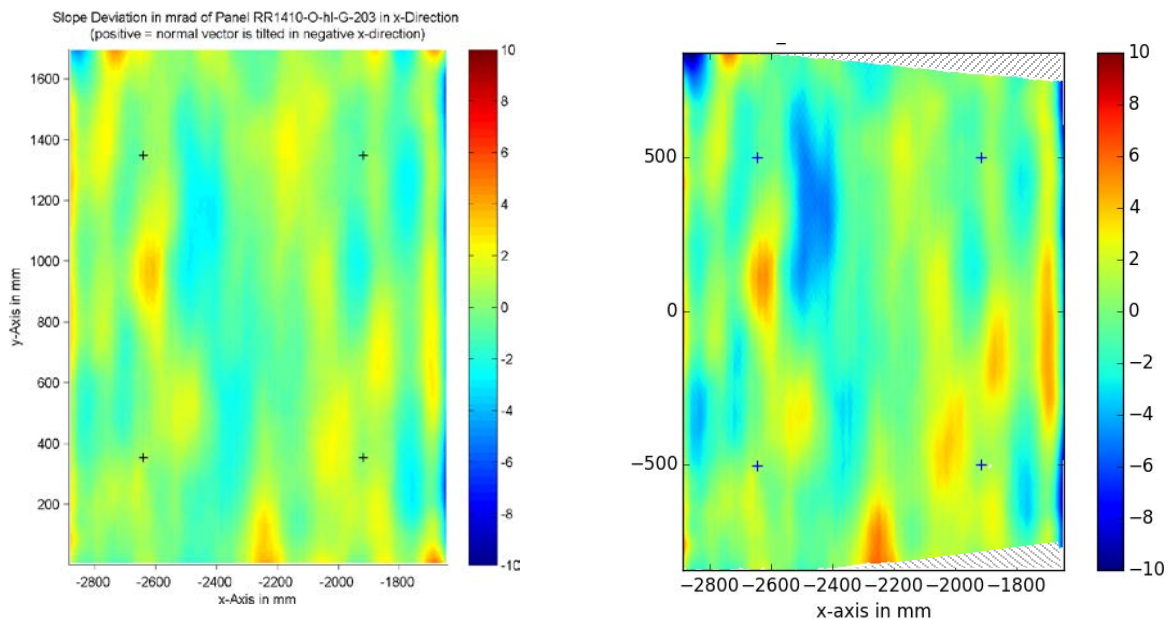
Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) (Navarra, Spanien) und dem CIEMAT (Plataforma Solar, Tabernas, Spanien). Die Messungen wurden dort in vertikaler Lage (CENER) und in horizontaler Lage (CIEMAT) durchgeführt. Eine Übersicht über die verschiedenen Messaufbauten und Messrandbedingungen in den einzelnen Laboren gibt Tabelle 4.

Die Auswertungen der Messungen bei CIEMAT sind noch nicht abgeschlossen. Sie werden bis Ende Juni 2016 im EU-Projekt SFERA-II erwartet. Nach dem Bruch von zwei Spiegeln beim Rückversand von CIEMAT in Spanien zu Fraunhofer-ISE in Freiburg stehen nur noch die zwei verbleibenden Spiegel zum Vergleich der Messergebnisse mit weiteren Partnern der Solar-PACES Task III zur Verfügung.

**Tabelle 4:** Übersicht über Messverfahren und Messrandbedingungen in den einzelnen Laboren der Round-Robin-Vergleichsmessung

	DLR	ISE	CENER	CIEMAT
<b>Messverfahren</b>	Deflektometrie	Fringe Reflection (Deflektometrie)	Fringe Reflection (Deflektometrie)	Fotogrammetrie Punkte-Raster
<b>Messlage Spiegel</b>	horizontal	horizontal	vertikal	horizontal
<b>Spiegelhalterung</b>	DLR-Rahmen	DLR-Rahmen	CENER-Rahmen	DLR-Rahmen
<b>Spiegelfixierung</b>	lose, festgezogen	lose, festgezogen	lose	lose, festgezogen
<b>Messgenauigkeit (SDx_RMS)</b>	0,2 mrad	0,2 mrad	keine Angaben	0,3 mrad
<b>Genauigkeitsüberprüfung</b>	Wasseroberflächenmessung (2013 / 2014)	Wasseroberflächenmessung (2013 / 2014)	analytische Unsicherheitsanalyse	-
<b>Auswertesoftware</b>	QDec	Fringe Processor		

In erneuten Messungen 2014 im Anschluss an die Round-Robin Kampagne konnten die Messergebnisse aus 2013 bei DLR und Fraunhofer ISE jeweils bestätigt werden. Die folgende Abbildung zeigt die am DLR und am Fraunhofer ISE ermittelten lokalen Steigungsabweichungen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung bei der Identifikation lokaler Steigungsabweichungen, sodass die Spiegelcharakteristik klar erkennbar ist. Die absoluten Abweichungen hingegen unterscheiden sich. Die Differenzen der SDx-Werte betragen im Mittel 0,6 mrad, für die SDy-Werte 0,8 mrad, wobei die SDx- und SDy-Werte jeweils systematische Abweichungen zeigen.



**Abbildung 44:** SDx Verteilung auf dem Spiegel „203“, Farbskala von -10 mrad (blau) bis +10 mrad (rot); links: DLR, rechts: Fraunhofer ISE

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die einzelnen, über drei Messungen gemittelten Qualitätsparameter (horizontal lose Messung) für die Spiegel „202“ und „203“ für die Messungen bei DLR und Fraunhofer ISE. Hierbei bezeichnet „x“ die gekrümmte Achse eines Spiegels („transversal“) und „y“ die nicht gekrümmte („longitudinal“).

**Tabelle 5:** Gemittelte gemessene Formgenauigkeitsparameter der Spiegel „202“ und „203“ in horizontaler Lage, lose aufgelegt auf Laborrahmen, 5 mm Rand, DLR

Mirror Panel	SDx in mrad	SDy in mrad	FDx in mm	FDy in mm
202 (2013)	1,34	2,75	6,59	9,41
202 (2014)	1,34	2,70	6,55	9,25
203 (2013)	1,29	2,79	6,35	9,56
203 (2014)	1,31	2,77	6,43	9,49

**Tabelle 6:** Gemittelte gemessene Formgenauigkeitsparameter der Spiegel „202“ und „203“ in horizontaler Lage, lose aufgelegt auf Laborrahmen, Fraunhofer ISE

Mirror Panel	SDx in mrad	SDy in mrad
202 (2014)	2,0	1,9
202 (2016)	1,9	1,9
203 (2014)	2,1	1,9
203 (2016)	1,9	2,0



Die Messungen von CENER konnten abweichend zu den definierten Randbedingungen nur in vertikaler Messlage durchgeführt werden, wodurch ein direkter Vergleich zu den ansonsten in horizontaler Messlage durchgeführten Messungen keine aussagekräftigen Schlüsse zulässt. Zusätzlich setzt sich das Messergebnis der Messungen von CENER für einen Spiegel aus zwei einzelnen Messungen zusammen. Die Fügeline ist in den Messergebnissen erkennbar. Die Messungen zeigen Abweichungen von den am DLR und Fraunhofer ISE ermittelten Werten.

Eine weitere Runde der Round-Robin-Vergleichsmessungen wird erforderlich, da noch weitere signifikante Unterschiede aus dem Daten-Postprocessing geprüft werden sollen. Vor einem zweiten Durchgang der Round-Robin-Vergleichsmessung soll daher eine Methodik für den Vergleich des Postprocessings entwickelt werden (Definition sinnvoller Zwischenschritte). Die einzelnen Schritte sollen dann möglichst gleichzeitig bei den teilnehmenden Partnern durchlaufen werden, damit eine zeitnahe Diskussion der Ergebnisse möglich ist und der nächste Schritt vollzogen werden kann.

Die Fortführung der Arbeiten erfordert die Förderung eines Folgeprojektes, in dem dann auch der Normungsvorschlag zu konkretisieren und international weiter abzustimmen ist.

#### ***II.1.5.3. AP5.3 – Auswahl und Überführung in einen Vorschlag für einen Standard***

Ziel dieses Teilarbeitspaketes war es ein validiertes Verfahren zur Bestimmung der Formtreue von Reflektoren für solarthermische Kraftwerke als Grundlage für einen Normungsvorschlag auszuarbeiten, der die leicht unterschiedlichen Ansätze bei DLR und ISE integriert.

Die Richtlinie „Measurement and Assessment of Mirror Shape for Concentrating Solar Collectors“ steht seit ihrer Vorstellung im September 2013 den internationalen Teilnehmern der Solar-PACES Task III Arbeitsgruppe zur weiteren Ergänzung und Kommentierung zur Verfügung. Für die weitere Ausarbeitung und den internationalen Konsens sind die Ergebnisse der neuen Messkampagnen erforderlich.

Wie auch in der Vorbereitung der Round-Robin-Vergleichsmessung sind in die Ausarbeitung des Normungsvorschlages wesentliche Erkenntnisse aus vorhergehenden wissenschaftlichen Arbeiten eingeflossen. So wurden am Beispiel von Konzentratorspiegeln der RP3-Geometrie die Spiegelorientierung, die Spiegelhalterung und die Spiegelfixierung als wesentliche Randbedingungen für ein reproduzierbares Messergebnis identifiziert<sup>15,16</sup>.

---

<sup>15</sup> S. Meiser, E. Lüpfert, B. Schiricke und R. Pitz-Paal (2014): Analysis of parabolic trough concentrator mirror shape accuracy in different measurement setups. Energy Procedia (49), Seiten 2135-2144

<sup>16</sup> S. Meiser, E. Lüpfert, B. Schiricke und R. Pitz-Paal (2015): Conversion of parabolic trough mirror shape results measured in different laboratory setups. Solar Energy, 111, Seiten 396-406

### **II.1.6. AP6 – Entwicklung eines Prüfstandes und standardisierten Messverfahrens zur Qualifizierung von flexiblen Rohrverbindungen (REPA) (DLR)**

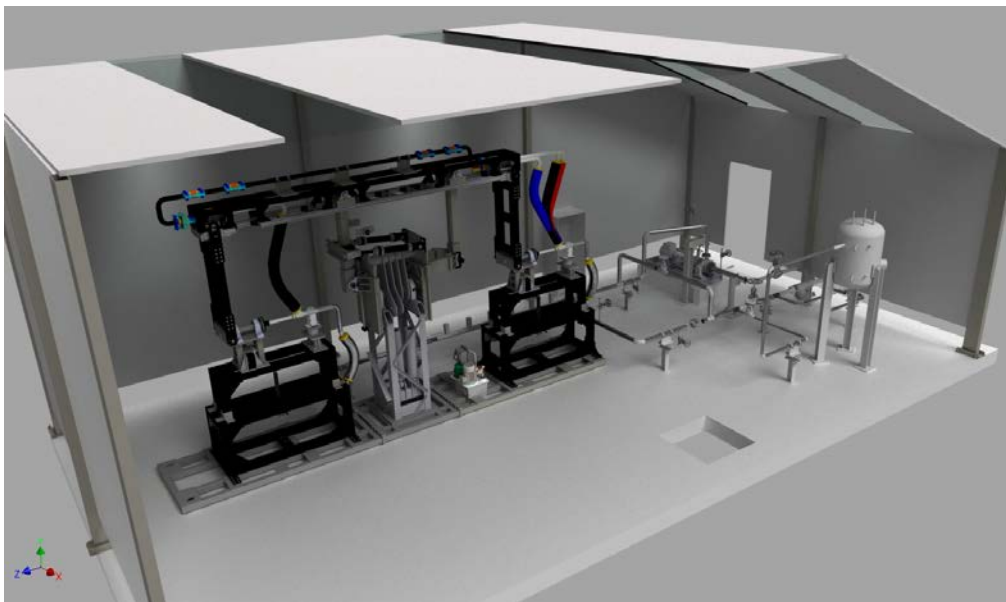
Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Prüfstandes und standardisierter Messverfahren zur Qualifizierung von flexiblen Rohrverbindungen bzw. REPA (Rotation and Expansion Performing Assembly). Mit diesem Prüfstand soll die Kinematik von Parabolrinnenkollektoren nachgebildet werden, um Funktionalität und Lebensdauer von flexiblen Rohrverbindungen durch zyklische Dauerbelastung beschleunigt und realitätsnah zu charakterisieren.

Zum Zeitpunkt der Beantragung des Verbundvorhabens StaMeP war davon auszugehen, dass am Standort Jülich geplante, umfangreiche Infrastrukturmaßnahmen auch die rechtzeitige Errichtung einer großen, wärmeträgerfluidführenden Testanlage für Parabolrinnenkollektoren umfassen würden. Sie sollte das für den REPA-Teststand notwendige temperierte Wärmeträgerfluid zur Verfügung stellen und entsprechende bauliche Voraussetzungen wie eine Schutzeinhausung und eine Auffangwanne zur Abscheidung von austretendem Wärmeträgerfluid bieten. Als sich im Laufe der Projektlaufzeit Verzögerungen dieser Maßnahmen abzeichneten, die den Aufbau des REPA-Teststands zu gefährden drohten, wurden verschiedene alternative Realisierungsmöglichkeiten intensiv im Detail untersucht.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Mittel und Zeit wurde schließlich als Aufstellort für den Prüfstand die Plataforma Solar de Almería (PSA) in Spanien gewählt. Durch Kofinanzierung mit dem Projekt SFERA II, welches eine teilweise gleiche Zielsetzung hat, wurde die Möglichkeit geschaffen, den REPA Teststand in Kooperation mit dem spanischen Forschungspartner CIE-MAT funktional sinnvoll erweitert aufzubauen.

#### **II.1.6.1. AP6.1 – Entwicklung eines Prüfstandkonzepts**

In diesem Arbeitspaket wurde ein Prüfstand zur beschleunigten Alterung von flexiblen Rohrverbindungen in Parabolrinnenkraftwerken (REPA) entwickelt, welcher die unterschiedlichen Belastungen in Kollektoren realitätsnah abbildet und eine große Flexibilität im Hinblick auf die Anforderungen verschiedener REPA-Bauformen und –Größen sowie deren Kollektoren bietet. Die wesentlichen Komponenten des Prüfstandes sind eine Kinematikeinheit mit Hydraulikaggregat und eine eigene, maßgeschneiderte Wärmeträgeranlage. Weitere Elemente sind die Elektronik und Datenerfassung, eine Bodenplatte sowie eine Einhausung. Abbildung 45 zeigt eine CAD-Ansicht des entwickelten Prüfstands mit Kinematikeinheit und Wärmeträgeranlage sowie Bodenplatte und Einhausung.



**Abbildung 45:** CAD-Ansicht des Prüfstandes zur beschleunigten Alterung von flexiblen Rohrverbindungen (REPA); Kinematikeinheit (links), Wärmeträgeranlage (rechts)

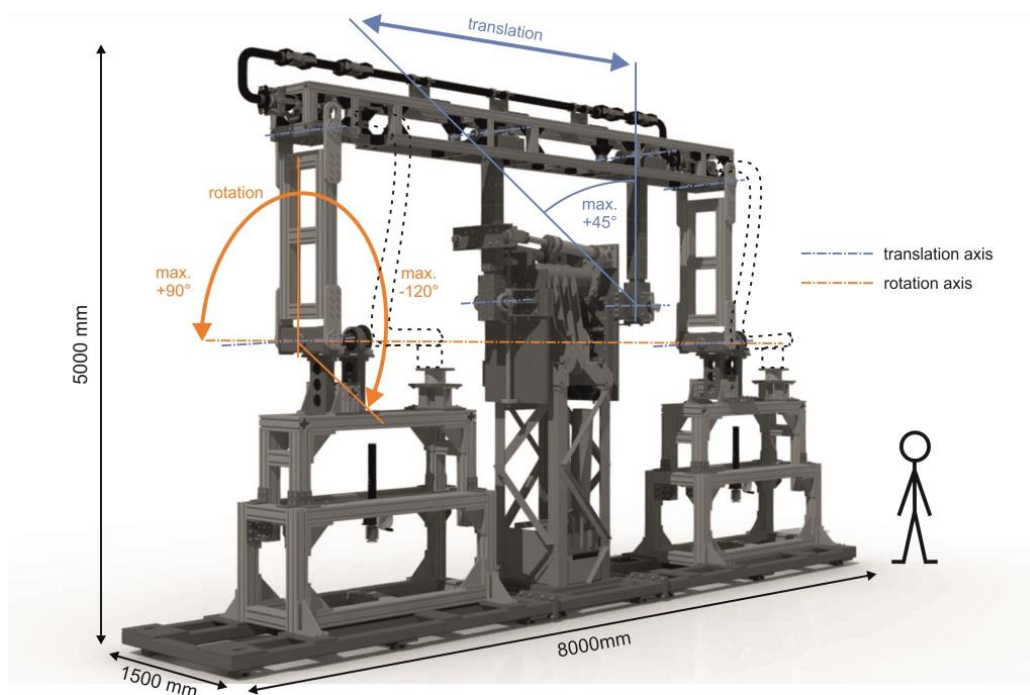
Mit dem entwickelten Prüfstand ist ein paralleler Testbetrieb von zwei REPAs möglich, welchen ein identisches Belastungsprofil aufgeprägt wird. Dadurch sind eine direkte Vergleichbarkeit sowie eine erhöhte Messfrequenz von Belastungstests möglich, welche im Zeitraum von einigen Wochen bis Monaten die Lebensdauer von 25 Jahren Kraftwerksbetrieb beschleunigt in etwa 10.000 einzelnen Zyklen abbilden.

Die Kinematikeinheit wurde im Rahmen eines Konstruktionsauftrages in enger Zusammenarbeit mit einem Ingenieurbüro entwickelt und besteht im Wesentlichen aus der Antriebseinheit eines typischen Parabolrinnenkollektors, einem sogenannten Drive Pylon. Kombiniert wird die durch den Drive Pylon aufgeprägte einachsige Drehung des kollektorseitigen REPA Anschlusspunktes mit einer translatorischen Bewegung, welche der thermisch induzierten Ausdehnung der Absorberrohre eines Kollektors entspricht. Dadurch kann das Bewegungsprofil des Prüfstandes exakt dem realen Anwendungsfall in Bezug auf die Schwenkbereiche von Translation und Rotation sowie dem Start-Stopp Betrieb der Rotationsbewegung mit hoher Schrittzahl angepasst werden. Auch können durch die Antriebseinheit die Drehmomente erzeugt werden, welche in Kollektoren maximal vorherrschen. Die bisher nicht näher untersuchten und schwer abzuschätzenden maximalen Losbrechmomente, welche in den REPAs auftreten, können dadurch im gesamten relevanten Bereich aufgebracht und untersucht werden. Die Kinematikeinheit wurde entsprechend der maximal anzunehmenden Kräfte und Momente ausgelegt, um diesen Belastungen auch in Langzeitversuchen standzuhalten.

Um Tests an REPAs unterschiedlichster Bauformen und –Größen zu ermöglichen wurde die Lage der beiden Anschlusspunkte eines REPA im Prüfstand einstellbar gestaltet, sodass die Kinematik der gängigen, einachsig nachgeführten Kollektoren abgebildet werden kann. Es können Fokallängen von 1 m bis 2,3 m eingestellt und der Versatz des Drehpunktes der translatorischen Bewegung zur Drehachse der Rotationsbewegung kann im Bereich bis 0,34 m variiert werden. Zudem ist ein direkter Antrieb von Drehdurchführungen möglich, was für den Betrieb von REPAs aus flexiblen Schläuchen notwendig ist. Je nach Bauform können REPAs von mindestens 1,3 m Länge in Richtung der Hauptrotationsdrehachse getestet werden. Zur Erfassung von Kräften und Momenten an den Aufnahmepunkten der REPAs in allen Raumrichtungen sind Dynamometer vorgesehen, welche derart integriert sind, dass der Einfluss von Kräften, die aus

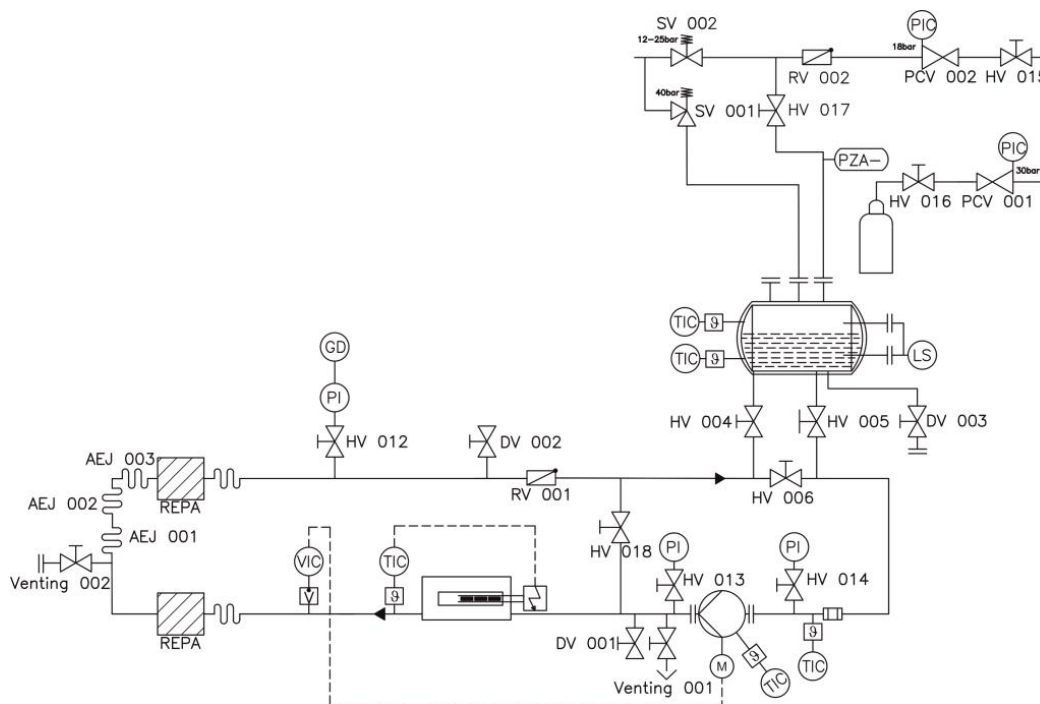
thermisch induzierten Dehnungen der feststehenden Rohrleitungselemente resultieren, minimiert wird. Somit können die Kräfte und Momente, welche durch flexible Rohrverbindungen auf die Kollektorstruktur wirken, genau untersucht werden. Insgesamt besteht eine hohe Modularität und Erweiterbarkeit des Prüfstandes durch Ausführung vieler Prüfstandselemente als Konstruktion aus einem Aluminiumprofilsystem.

Abbildung 46 zeigt das-CAD Modell der entwickelten Kinematikeinheit in der finalen Version. Die Positionen der REPA-Prüflinge sind gestrichelt in schwarz dargestellt.



**Abbildung 46:** CAD-Modell der Kinematikeinheit

Um eine realitätsnahe Prüfung von REPAs zu ermöglichen, wurde eine Wärmeträgeranlage ausgelegt und alle einzelnen Anlagenkomponenten ausgewählt. Die Wärmeträgeranlage kann den Prüfstand mit unterschiedlichen Wärmeträgerölen bei Temperaturen bis 450 °C, Drücken bis 40 bar und Volumenströmen zwischen 6 und 60 m<sup>3</sup>/h speisen. Es können REPAs mit Durchmessern von bis zu 3" angeschlossen werden. Aus Gründen der Betriebssicherheit ist eine schnell auslösende Sicherheitsabschaltung der gesamten Anlage integriert. Auch das vergleichbar kleine Fluidvolumen der Wärmeträgeranlage ist ein Vorteil im Hinblick auf Sicherheit und Umweltschutz, da bei den Funktionstests im Prüfstand von einer Erzeugung von Schadens- bzw. Leckagefällen der flexiblen Rohrleitungskomponenten auszugehen ist. Die autarke Wärmeträgeranlage bietet zudem die Perspektive, künftig auch für andere forschungs- bzw. entwicklungsrelevante Fragestellungen eingesetzt werden zu können. Aktuell sind hier beispielsweise Untersuchungen auf dem Gebiet der Wärmeträgeröle interessant, bei denen es um die Abtrennung von Wasserstoff oder das Alterungsverhalten der Öle geht. Abbildung 47 zeigt das Anlagenschema der Wärmeträgeranlage.

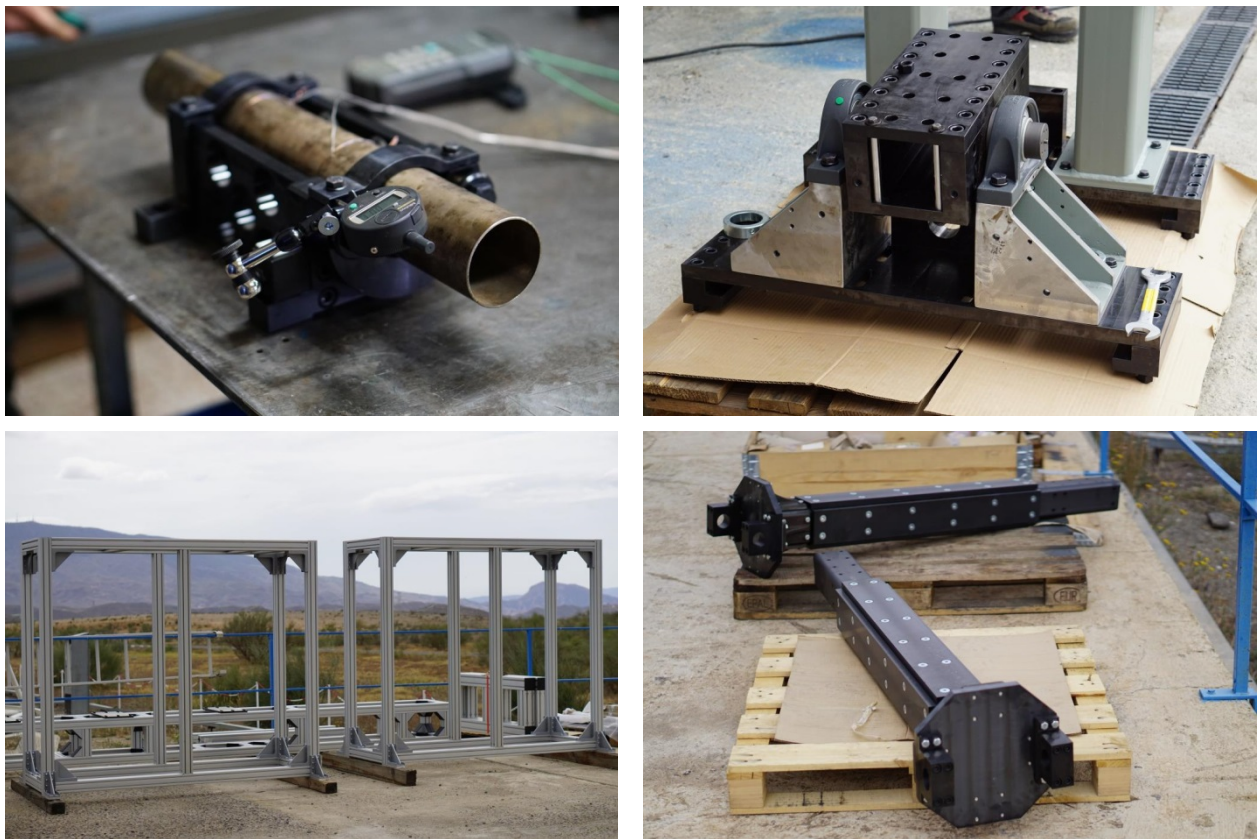


**Abbildung 47:** Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (P&ID) der Wärmeträgeranlage

#### II.1.6.2. AP6.2 – Aufbau und Inbetriebnahme

Bei Projektende und zum Zeitpunkt der Berichtserstellung befindet sich die Kinematikeinheit noch im Aufbau. Um den Prüfstand mit den zur Verfügung stehenden Mitteln funktionsfähig aufbauen zu können, war es unvermeidbar, einige zu diesem Zweck nicht erforderliche Komponenten noch nicht zu beschaffen. Hiervon hauptsächlich betroffen sind die Dynamometer zur Messung von Kräften und Momenten (von denen nur eines der vier vorgesehenen angeschafft wurde) sowie Kompensatoren in der Rohrleitung der Kinematikeinheit (von denen nur ein Satz für eine der beiden Messstellen bestellt wurde). Weiterhin wurden bei der Wärmeträgeranlage Abstriche bei einigen Armaturen gemacht und auf einige Sensoren verzichtet. Alle ansonsten benötigten Teile sind bereits beschafft und die einzelnen Baugruppen vormontiert. Eine Bodenplatte, welche zum Abscheiden von ausgetretenem Öl über eine Drainage verfügt, ist gegossen und die Bodenanker für die Kinematikeinheit darin eingelassen. Als nächster Schritt steht ein Funktionstest der speziell für den Teststand ausgelegten Hydraulikeinheit kurz bevor, welche den Drive Pylon sowie zwei parallel wirkende Zylinder für die Translationsbewegung antreibt. Im Anschluss daran wird der Zusammenbau aller Baugruppen zum fertigen Prüfstand erfolgen. In Abbildung 48 sind ausgewählte vormontierte Baugruppen dargestellt.





**Abbildung 48:** Vormontierte Baugruppen der Kinematikeinheit: entwickelte Rohrhalterung (oben links), Aufnahme der Supportarme (oben rechts), Baugruppen aus Aluminiumprofilsystem (unten links), Supportarme (unten rechts)

Auch Elektronik und Datenerfassung werden derzeit gefertigt und anschließend montiert. Die Wärmeträgeranlage ist - wie in Abbildung 49 zu erkennen - bereits größtenteils aufgebaut und die wesentlichen Komponenten wie Pumpe, Ventile und Sensorik sowie die Rohrleitungen verschweißt und auf der Bodenplatte montiert. Im Anschluss an den Zusammenbau des Prüfstandes wird eine Einhausung in Form einer Leichtbauhalle aufgebaut, um den Prüfstand vor Witterungseinflüssen zu schützen und die Sicherheit von Mensch und Umwelt im Schadensfall zu gewährleisten. Finanziert wird die Leichtbauhalle aus Infrastrukturmitteln auf der PSA.



**Abbildung 49:** Aufgebaute Wärmeträgeranlage mit Pumpe, Ventilen und Ausgleichsbehälter

Aufgrund der starken Verzögerungen steht die Erreichung der Ziele in diesem Arbeitspaket demnach kurz bevor. Die noch ausstehenden Arbeiten werden im Rahmen des Kooperationsprojektes SFERA II nahtlos weitergeführt, sodass der Prüfstand für die Erprobung des Prüfverfahrens und den Einsatz in Industrie- und/oder weiterführenden Forschungsprojekten in absehbarer Zeit einsatzbereit sein wird.

#### ***II.1.6.3. AP6.3 – Entwicklung und Erprobung eines standardisierten Prüfverfahrens***

Die in Arbeitspaket 6.3 geplante Erprobung eines Testverfahrens zur standardisierten Prüfung von REPAs war durch die entstandene Verzögerung bei der Prüfung verschiedener Realisierungsmöglichkeiten für den Teststand und den erhöhten Aufwand innerhalb der Projektlaufzeit mit den bewilligten Mitteln leider nicht mehr möglich. Geplant ist, diese in Folgeprojekten und durch die Erfahrungen aus Messkampagnen für die Industrie voranzutreiben und zu erreichen.

Insgesamt ist es gelungen, ein sehr umfassendes Messsystem zu entwickeln, welches neben der realitätsnahen Charakterisierung von flexiblen Rohrverbindungen auch für weitere wissenschaftliche Untersuchungen genutzt werden kann und sich auch dank der Kooperation mit CIEMAT gut in die europäische Testinfrastruktur einfügt. Es zeichnen sich bereits einige konkrete Messaufträge für die Industrie ab, die gestartet werden können, sobald der für 2016 geplante Abschluss der Aufbauarbeiten des Prüfstandes erreicht ist.

## II.1.7. AP7– Unterstützung der Normungsarbeiten durch Überführung der Ergebnisse (DLR+ISE)

### II.1.7.1. Übersicht der Normungskooperation

Im Rahmen dieses Arbeitspaket konnten Ergebnisse aus den anderen Arbeitspaketen und teilweise von Vorarbeiten in internationale Normungsarbeit in die entsprechenden Strukturen eingebracht werden.

Folgende wesentliche Gruppierungen sind die Adressaten dieser Zusammenarbeit:

Im Jahr 2011 wurde von IEC (International Electrotechnical Commission, Genf, Schweiz) auf Vorschlag Spaniens ein Technisches Komitee für Solarthermische Kraftwerke beschlossen und ins Leben gerufen. Es handelt sich um TC 117 [www.iec.ch/tc117](http://www.iec.ch/tc117). Das Sekretariat ist bei der spanischen Normungsorganisation AENOR, Madrid, Spanien [www.aenor.es](http://www.aenor.es) bzw. dem spanischen CSP-Industrieverband Protermosolar [www.protermosolar.com](http://www.protermosolar.com) angesiedelt. Als Vorsitzender (Chair) des Technischen Komitees wurde im Jahr 2015 der vom deutschen Komitee dafür vorgeschlagene Prof. Dr. Werner Platzer von Fraunhofer ISE gewählt.

Ebenfalls seit 2011 existiert dazu ein nationales Spiegelkomitee DKE/K 374 „Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung“ bei der Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE), Frankfurt [www.dke.de](http://www.dke.de). Dort existieren aktuell Arbeitskreise zu den Themen Terminologie, Solarstrahlung, Kollektoren und Receiver. Mehrfach jährlich finden Treffen und Telefonkonferenzen statt, um die Rückmeldung aus Deutschland in die internationale Arbeit der Projektteams in TC 117 zu entwickeln und zu koordinieren. Der deutsche Industrieverband DCSP [www.deutsche-csp.com](http://www.deutsche-csp.com) hat sein Interesse an der Normungsarbeit bekräftigt, Teilnehmer der Firmen sind auf Komitee-Ebene jedoch erst wenig vertreten.

Bereits seit 2010 arbeitet die spanische Normungsstelle AENOR im CTN 206 auf Initiative der spanischen Industrie am Thema der solarthermischen Kraftwerke (AEN/CTN 206, „Stromerzeugung“ Subkomitee SC117). Über die direkte Zusammenarbeit über den Standort des DLR Instituts für Solarforschung in Almeria ([www.psa.es](http://www.psa.es)) und die DLR-Ausgründung CSP Services GmbH besteht die Möglichkeit zu inhaltlichen Beiträgen in Arbeitsgruppen und zu spanischen Entwürfen. Damit wird die Veröffentlichung der entwickelten Methoden für die relevanten internationalen Märkte der deutschen Technologie beschleunigt. Daraus wurden drei spanische Normen unter den Nummern UNE 206010:2015 (Leistungstests Parabolrinnen-Kraftwerke), UNE 206011:2014 (Solarstrahlungsdatensätze) und UNE 206009: 2013 (Terminologie) veröffentlicht. Die Texte gehen auf dem Weg als ausformulierte Basis in die dadurch vorangetriebene Arbeit auf IEC-Ebene ein.

SolarPACES, eine Vereinbarung zu technologischen Zusammenarbeit in der Internationalen Energieagentur IEA in Paris, arbeitet als Netzwerk von Experten aus Forschung und Industrie seiner mittlerweile 20 Mitgliedsländer [www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org) an technologische Entwicklung und Verbreitung der Technologien für solarthermische Kraftwerke und solarchemische Anwendungen. In zwei der sechs Fachgruppen, Task I und Task III werden die Themen der technischen Standards und Richtlinien-Entwürfe seit einigen Jahren zunehmend bearbeitet, da sie einen wichtigen Beitrag zur Verbreitung des Stands von Forschung und Technik angesehen werden. SolarPACES-Richtlinien-Entwürfe gibt es für die Spiegel, Receiver für Parabolrinnen, Feldabnahmetests für Parabolrinnen-Kraftwerke und Heliostate.

### **II.1.7.2. Normungsaktivitäten während des Projektes**

In mehreren Arbeitsgruppen-Treffen wurden im Rahmen der SolarPACES-Konferenz 2012, September, Marrakesch, Marokko) der Stand der Arbeiten des DLR präsentiert und mit den internationalen Teilnehmern diskutiert. Für Spiegelreflektivität wurde im November 2012 eine entsprechend angepasste Fassung der SolarPACES-Guideline erstellt. Für Spiegelform lag zu dem Zeitpunkt der erste Guideline-Entwurf des DLR in der Überarbeitung mit deutschen Industriepartnern (Flabeg, Flagsol, CSP Services) vor. Für Receiver-Wärmeverluste lag ein Guideline-Entwurf mit Kommentaren aus USA und Italien vor. Diese Guidelines bleiben zu jeder Zeit ihrer Fortentwicklung eine wichtige inhaltliche Basis in der Abstimmung mit nationalen und internationalen Interessenvertretern aus Forschung und Industrie.

Die Mitarbeit in der Normung wurde formalisiert innerhalb des deutschen Spiegelgremiums DKE/K374 „Solarthermische Kraftwerke“ und der betreffenden internationalen Arbeitsgruppe IEC TC 117 „Solarthermal Electric Powerplants“ geleistet. Während auf nationaler Ebene von mehreren Experten von DLR/Fraunhofer ISE Zuarbeit und kritische Durchsicht der entstandenen Arbeitspapiere leisteten, vertraten Herr Lüpfer von Seiten DLR als Obmann des deutschen Komitees und Herr Platzer von Seiten Fraunhofer ISE als Stellvertreter die Interessen auch im internationalen Bereich.

Vom 29.10. bis 1.11.2012 fand das 2. Treffen des internationalen Komitees IEC/TC 117 in Tel Aviv/Israel mit Teilnehmern von DLR Fraunhofer ISE statt. Es wurde die Strukturierung der Ad-hoc-Gruppen AHG1 "General", AHG2 "Components and Systems" und AHG3 "Thermal Storage" diskutiert sowie die Verbindung zu anderen Normungsaktivitäten innerhalb IEC und ISO. So wurde die Abgrenzung und die Liaison zu einem neuen Komitee zu Speichern für elektrische Energie (Vorsitz Japan) diskutiert.

Innerhalb einer Telefonkonferenz mit Vertretern des deutschen Komitees DKE374 wurde das weitere Vorgehen bezüglich der Nennung von nationalen Experten für den Informationsaustausch mit diversen normungsnahen Forschungsaktivitäten (wie z.B. StaMeP und SolarPACES) sowie die Initiierung von Normungsprojekten diskutiert.

Für das Thema Spiegelreflektivität wurde Anfang 2013 auf der Basis der kontinuierlichen Diskussionen mit den internationalen Partnern eine neue Fassung der SolarPACES Reflectance Guideline (V2-4) erstellt. Dabei wurden weitere Verbesserungen mit den verfügbaren Messeinrichtungen in den Labors erforderlich. Diese Aktivität wurde durch einen innerhalb von SolarPACES initiierten internationalen Ringversuch mehrerer beteiligter unabhängiger Labors für hemisphärische und gerichtete Reflexion unterstützt. Für die Spiegelform stand seit Juni 2013 der Guideline-Entwurf des DLR mit zusätzlichen Ergebnissen der internationalen Arbeitsgruppe zur Verfügung. Spezielle Entwürfe wurden auf Arbeitsgruppenebene erstellt für Abrasionstests auf Spiegeln. Für optische Tests von Receiverrohren für Parabolrinnenkollektoren im Linear-Sonnensimulator wurden die Entwürfe des DLR bearbeitet.

Am 10. Januar 2013 fand in Frankfurt das Treffen des DKE-Komitees K374 statt, an dem E. Lüpfer von Seiten des DLR und W. Platzer von Seiten des Fraunhofer ISE teilnahmen. Es wurden die deutschen Beiträge für die Strukturierung der Adhoc-Gruppe AHG2 "Components and Systems" diskutiert sowie die Verbindung zu anderen Normungsaktivitäten innerhalb IEC, ISO und SolarPACES.

Weitere Zusammenarbeit fand mit dem SolarPACES guiSmo-Projekt statt, in dem es zurzeit vor allem um eine Klärung der Nomenklatur, Begrifflichkeiten und Formelzeichen geht. Die Beschreibung von optischen und thermischen Verlusten wurde in einem Entwurfsdokument behandelt. Ebenso wie in den Diskussionen in AENOR stehen Themen wie Kollektorfläche, elekt-



rische Erzeugung (netto/brutto), Kapazität, Nennleistung sowie Einstrahlungskenngrößen in den Arbeitsgruppen im Vordergrund.

Es fanden Telefonkonferenzen mit spanischen Kollegen zu den Themen Spiegelform, optische Tests von Receivern und Tests zur Haltbarkeit von Oberflächen statt. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Industrieverband Deutsche CSP wurde die Bedeutung von hochwertigen Spezifikationen für Komponenten und ganze Kraftwerke und deren Berücksichtigung in Ausschreibungen mit deutscher Finanzierungsbeteiligung (z.B. KfW) betont.

Im November 2013 fand die 3. Tagung des Komitees IEC TC 117 "Solar Thermal Electric Plants" in Northbrook/USA statt. Unter Leitung von Herrn Matthias Gommel, Siemens, als stellvertretendem Chair nahmen Vertreter von DLR und anderen Einrichtungen aus Deutschland, USA, Spanien, China und Japan sowie von IEC teil. Es wurden sogenannte New Work Item Proposals (NWIP) vorgestellt, die zwischenzeitlich zu Projekt-Teams wurden.

62862-1-1: Terminology – DLR koordiniert auf deutscher Ebene Kommentare und Erkenntnisse von Seiten DLR und Fraunhofer ISE zu dem aus Spanien kommenden Entwurf.

62862-1-2: Meteorological Year – Firma Suntrace koordiniert Kommentare von Seiten DLR und Fraunhofer ISE zu dem aus Spanien stammenden Entwurf.

62862-3-1: Functional Parameters STE PTC (Parabolrinne) und 62862-5-1: Functional Parameters STE LFC (Linear Fresnel) – DLR, Fraunhofer ISE und Novatec analysieren den Arbeitsvorschlag und stimmen die weitere Vorgehensweise ab. Es geht um AbnahmeprozEDUREN und Charakterisierungen des Kollektors, wie sie in diesem Projekt in AP1 und AP2 behandelt werden.

62862-3-2: Trough collector und 62862-5-2: Fresnel Collector – DLR, Fraunhofer ISE und Novatec stimmen die weitere Vorgehensweise ab.

62862-1-3: Reflectors – DLR und Fraunhofer ISE bringen die Ergebnisse aus AP3 mit ein und unterstützen entsprechend die Arbeitsgruppe.

62862-3-3: Receivers – DLR und Fraunhofer ISE bringen die Ergebnisse aus AP4 mit ein und unterstützen entsprechend die Arbeitsgruppe.

62862-2-1: Thermal storage characterization – Dieses Thema hat keine inhaltliche Überschneidung mit Arbeiten in dem Projekt StaMeP, wird aber über das Projekt CSPBankability mit abgedeckt und entsprechend von DLR und Fraunhofer ISE unterstützt.

Weitere Zuarbeit zu pränormativen Dokumenten hat auf der Ebene von SolarPACES-Arbeitsgruppen und bei Arbeitsgruppen im AENOR statt stattgefunden. Es wurden hier inhaltliche Fortschritte bei den folgenden Themen von Leistungsparametern und Beständigkeit erreicht:

- Messung des optischen Wirkungsgrads von Receivern im Linear-Sonnensimulator (DLR)
- Thermische Belastung in Kombination mit optischen und thermischen Tests zur Untersuchung der Beständigkeit von Receivern (DLR)
- Mechanische Belastung von Vakuum-Receivern (Faltenbalg-Lebensdauer, Beständigkeit der Antireflexschicht) (DLR)
- Spiegelform (DLR, ISE)
- Reflexionsgradmessung (DLR, ISE)
- Bewitterungstests für Spiegel (DLR)
- Terminologie (DLR, ISE)



Das 4. Treffen des internationalen Normungskomitees IEC TC117 fand im November 2014 in Tokio mit Teilnehmern von DLR und Fraunhofer ISE statt. Folgende Normungsvorhaben wurde eingereicht, national diskutiert und beschlossen:

- Projekt IEC 62862-3-2: Solar thermal electric plants - Systems and components - General requirements and test methods for parabolic-trough collectors
- Projekt IEC 62862-3-3: Solar thermal electric plants - Systems and components - General requirements and test methods for solar receivers
- Projekt IEC TS 62862-2-1: Solar thermal electric plants - Thermal energy storage for concentrated solar – General characterization (NWIP under voting, closing date 2014-12-19)
- Projekt IEC TS 62862-5-2: Solar thermal electric plants - Part 5-2: Systems and components - General requirements and test methods for linear Fresnel collectors

Ebenso wurden zukünftige Aktivitäten andiskutiert:

- Projektvorschlag "Yield analysis" - in diese Aktivität sollen die Ergebnisse des guisMo-Projektes und des deutschen Projektes CSP Bankability einfließen.
- 62862-1-3: Reflectors - Hier bringen DLR und Fraunhofer ISE Input aus AP3 mit ein und unterstützen entsprechend die Arbeitsgruppe.

Die Notwendigkeit einer Abstimmung zwischen ISO TC 180 und IEC TC 117 wurde in Japan offensichtlich, da bei den Projekten IEC 62862-3-2 und IEC 62862-3-3 ein möglicher Überlapp mit Aktivitäten des ISO TC 180 in Bezug auf Kollektor- und Komponentenprüfung gesehen wurde.

Das 5. Treffen des internationalen Normungskomitees IEC TC117 fand am 10. Dezember 2015 in Madrid mit Teilnehmern von DLR und Fraunhofer ISE statt. Das Treffen leitete Prof. Werner Platzer vom Fraunhofer ISE als Chairperson. Zielsetzung dieses Treffens war vor allem die Entschärfung des Konfliktes zwischen ISO TC 180 und IEC TC 117. Im Vorfeld hatten bereits Herr Lüpfer und Herr Platzer mit verschiedenen Akteuren (vor allem Ken Guthrie als Vorsitzender von TC 180, Stephan Fischer als Liaison zwischen den beiden TCs und Herrn Andreas Bohren als Vorsitzender der betroffenen Arbeitsgruppe von TC180) gesprochen und Kompromisslinien ermittelt. Es wurde im Konsens beschlossen, dass die beiden diskutierten Arbeitsgruppen IEC 62862-3-2: Solar thermal electric plants - Systems and components - General requirements and test methods for parabolic-trough collectors und IEC 62862-3-3: Solar thermal electric plants - Systems and components - General requirements and test methods for solar receivers beide in IEC TC 117 fortgeführt würden, wobei bei der ersten Gruppe sichergestellt wurde, dass die Grundlage der Prüfnorm ISO 9806 berücksichtigt werden würde, und bei der zweiten Norm zu gegebener Zeit die Überführung in eine gemeinsame Norm beabsichtigt sei. Für einige Normarbeitsgruppen wurden Projektleiter gesucht, da auf Grund der negativen Entwicklung des CSP-Marktes einige Firmen ihre Beteiligung nicht aufrechterhalten wollten. Diese Neubesetzung war ebenfalls erfolgreich.

Am weitesten fortgeschritten ist das Projekt IEC TS 62862-1-1 zu Terminologie, in dem alle Mitarbeiter - auch des Projektes StaMeP - Kommentare der deutschen Arbeitsgruppe sammeln - koordiniert durch Tobias Hirsch vom DLR. Die Kommentare zum Entwurf wurden an den spanischen Koordinator des IEC-Projektes geschickt und wurden in 2015 mit anderen internationalen Rückmeldungen zusammen diskutiert und in den internationalen Entwurf eingearbeitet.

Dennoch wurde auf dem Arbeitstreffen TC117 in Madrid beschlossen, vorerst noch nicht die Ergebnisse direkt in die webbasierte Nomenklatur von IEC TC1 einfließen zu lassen, da sich bei diesem jungen Arbeitsgebiet immer noch Anpassungen ergäben.

Das nächste IEC TC 117 Treffen findet im Oktober 2016 anlässlich der IEC Jahrestagung in Deutschland in Frankfurt statt. Inzwischen haben sich auch weitere Länder entschlossen in diesem Normungsprozess mitzuarbeiten. In 2015 und 2016 sind folgende Länder aktiv dazugestoßen: China, Russland und als neuestes Mitglied Marokko.

An folgenden weiteren Arbeitstreffen im Normungsumfeld haben sich DLR Solarforschung und/oder Fraunhofer ISE beteiligt an der internationalen Zusammenarbeit zur Normung beteiligt:

- Treffen mit Kraftwerkseigner/-betreiber RWE Andasol-3 mit Themen zu Wirkungsgradmessungen an Kollektor-Loops zwecks Produktionssteigerung (2015),
- Treffen zur Standardisierung von Strahlungsmessungen in IEA SHC Task 46 in Bern (2015)
- SolarPACES-Konferenz mit Task I und Task III Treffen zum internationalen Austausch mit Wissenschaftlern und Industrieteilnehmern bei den Themen Kollektorfeld-Ertragsmessung Best-Practice-Guide, Spiegelreflektivität, Spiegelform, Receiver-Wärmeverlust und Absorptionsmessung, Lebensdaueruntersuchungen (Oktober 2015)
- Austausch zwischen IEC TC-117, ISO TC-180 und CEN TC-312 bzgl. Kollektor-Wirkungsgrad (Abstimmung mit Norm ISO 9806), und bzgl. Direktstrahlungsmessung (Anpassung ISO 9060) (Oktober 2015, Dezember 2015)
- Treffen auf deutscher Ebene (DKE K374 Spiegelkomitee to ISO TC-117) zu den Themen Terminologie, Receiverrohre, Speicher, Kollektoren (Parabolrinne, Linear-Fresnel), fortwährend mehrfach jährlich.

**Tabelle 7:** Arbeitstreffen DKE 374

Sitzung	Datum	Ort	Teilnehmer
01. Sitzung DKE/K 374	2015-02-25	Frankfurt	DLR/ISE
02. Sitzung DKE/K 374	2012-02-15	Frankfurt	DLR/ISE
03. Sitzung DKE/K 374	2012-05-08	Frankfurt	DLR/ISE
04. Sitzung DKE/K 374	2013-01-10	Frankfurt	DLR/ISE
05. Sitzung DKE/K 374	2013-06-13	Frankfurt	DLR/ISE
06. Sitzung DKE/K 374	2014-04-29	Frankfurt	DLR/ISE
07. Sitzung DKE/K 374	2014-09-10	Frankfurt	DLR/ISE
08. Sitzung DKE/K 374	2014-12-03	Webkonferenz	DLR/ISE
09. Sitzung DKE/K 374	2015-01-12	Webkonferenz	DLR/ISE
10. Sitzung DKE/K 374	2015-02-25	Frankfurt	DLR/ISE
11. Sitzung DKE/K 374	2015-09-08	Frankfurt	DLR/ISE
12. Sitzung DKE/K 374	2016-02-15	Webkonferenz	DLR/ISE

Normung benötigt jeweils einen langen Vorlauf an pränormativer Forschung, an vergleichenden Untersuchungen. Diese Arbeiten werden im internationalen Rahmen innerhalb von SolarPACES Arbeitsgruppen („Tasks“) besprochen. Mit einem Projekt StaMeP konnte auch eine deutsche Teilnahme und ein deutscher Einfluss auf diese Ergebnisse sichergestellt werden. Mit entsprechenden Entwürfen zu Richtlinien („Guidelines“) – die noch nicht alle fertiggestellt und

veröffentlicht sind - innerhalb SolarPACES konnten durch die Finanzierung von StaMeP folgende Themen bearbeitet werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in den offiziellen Normungsprozess eingehen werden:

- Richtlinie zu Formtreuemessungen an Konzentratorspiegeln (AP5.3)
- Richtlinie zur Laborvermessung von Emissionsmessungen an zylindrischen Proben (AP 4.3)
- Richtlinie zur Vermessung des Reflexionsgrades von Reflektormaterialien (AP 3.2)
- Best Practice Richtlinie zur Dynamischen in-situ Leistungs- und Abnahmevermessung von linienkonzentrierenden Kollektoren und Feldern (AP 1 und AP 2)

Um diese Richtlinienentwürfe weiter in den Normungsprozess einzubringen, bedarf es von deutscher Seite weiterer Anstrengungen und entsprechender Ressourcen. Auch die vergleichenden Round-Robin-Tests der verschiedenen Vermessungsmethoden helfen, das Vertrauen in die Aussagekraft solcher Messungen zu erhöhen, und damit das wahrgenommene technische Risiko eines CSP-Kraftwerksbaus zu reduzieren. Da Risiko in der Finanzierung von Projekten jeweils auch mit schlechteren Konditionen (Risikoaufschlägen) verbunden wird, trägt die Normung und die entsprechende wissenschaftliche Vorarbeit auch dazu bei, dass Strom aus solarthermischen Kraftwerken damit preisgünstiger wird.

Alle im Rahmen des Projekts ausgearbeiteten Veröffentlichungen (Auflistung siehe II.3, Seite 71) stehen in engem Zusammenhang mit Normierungsarbeiten.

## II.2. Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen

Entwickler, Komponentenhersteller sowie Erbauer und Betreiber von solarthermischen Kraftwerken sind stark auf eine objektive Vergleichbarkeit der Leistungsfähigkeit von Komponenten und auf wirtschaftliche AbnahmeprozEDUREN für ganze Solarfelder angewiesen. Die Verbreitung validierter und abgestimmter Messmethoden zum Leistungsnachweis von spezifischen Komponenten solarthermischer Kraftwerke in Form von Richtlinien und Normen und ihre breite Anwendung in Forschung und Industrie erhöht die Aussagekraft und Akzeptanz der erzielten Messergebnisse. Damit nützt sie sowohl den Forschungseinrichtungen und Prüflaboren als auch deren Kunden in der Entwicklung und in der Vermarktung marktreifer Produkte.

Die Ergebnisse von Ringversuchen und zwischen DLR und ISE abgestimmten Guidelines bilden die Grundlage für Beiträge zum internationalen Standardisierungsprozess und steigern damit die Sichtbarkeit und Mitgestaltungsmöglichkeiten der deutschen Solarforschungsinstitute. SolarPACES-Richtlinien sind international in der CSP-Branche anerkannt und dienen als Referenz bis entsprechende Normen implementiert sind.

## II.3. Veröffentlichungen der Ergebnisse

### **Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbänden:**

- N. Janotte, G. Feckler, J. Kötter, S. Decker, U. Herrmann, M. Schmitz, E. Lüpfert: Dynamic performance evaluation of the HelioTrough collector demonstration loop – towards a new benchmark in parabolic trough qualification. SolarPACES Las Vegas, 2013, Elsevier Energy Procedia
- S. Meiser, E. Lüpfert, B. Schiricke, R. Pitz-Paal: Analysis of Parabolic Trough Concentrator Mirror Shape Accuracy in Different Measurement Setups. SolarPACES International Symposium Las Vegas, 2013, Elsevier Energy Procedia.
- S. Meiser, E. Lüpfert, B. Schiricke, R. Pitz-Paal (2015), Conversion of parabolic trough mirror shape results measured in different laboratory setups, Solar Energy 111, 396-406
- A. Heimsath, T. Schmid, P. Nitz (2015): Angle Resolved Specular Reflectance Measured with VLABS. In: Energy Procedia 69, S. 1895–1903.
- A. Hofer, D. Büchner, A. Heimsath, S. Fahr, K. Kramer, W. Platzer, S. Scholl. (2015): Comparison of Two Different (Quasi-) Dynamic Testing Methods for the Performance Evaluation of a Linear Fresnel Process Heat Collector. In: Energy Procedia (69), S. 84–95. Online verfügbar unter <http://www.elsevier.com/locate/procedia>.
- A. Heimsath, P. Lindner, E. Klimm, T. Schmid, K. Moreno, Y. Elon, M. Am-Shallem, P. Nitz (2015) Specular Reflectance of Soiled Glass Mirrors – Study on the Impact of Incidence Angles.

*(Veröffentlichung beim American Institute of Physics 2016 vorgesehen)*

- A. Hofer, L. Valenzuela, N. Janotte, J.I. Burgaleta, J. Arraiza, M. Montecchi, F. Sallaberry, T. Osório, M.J. Carvalho, F. Alberti, K. Kramer, A. Heimsath, W. Platzer, S. Scholl (2015) State of the Art of Performance Evaluation Methods for Concentrating Solar Collectors. SolarPACES International Symposium Cape Town.

*(Veröffentlichung beim American Institute of Physics 2016 vorgesehen)*

- A. Hofer, S. Perry, S. Fahr, K. Kramer, A. Heimsath, S. Scholl, W.J. Platzer (2016): Improved Performance Testing of Line-Concentrating Solar Collectors: Comprehensive Uncertainty Analysis for the Selection of Measurement Instrumentation.  
(Veröffentlichung in *Applied Energy* 2016 vorgesehen)

### **Messvorschriften und -richtlinien**

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Richtlinien erarbeitet bzw. maßgeblich weiterentwickelt:

- SolarPACES Reflectance Guideline: Parameters and Method to evaluate the Solar Reflectance Properties of Reflector Material for Concentrating Solar Power Technology  
*Richtlinie zur Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrads*
- SolarPACES Guideline Measurement and Assessment of Mirror Shape for Concentrating Solar Collectors  
*Richtlinie zur Formtreuemessung von Spiegeln für konzentrierende Solarkollektoren*
- Guideline for the Laboratory Measurement of Emittance on Cylindrical Samples  
*Richtlinie zur Messung der Emissivität an zylindrischen Proben*
- Best Practice Guideline: Dynamic in situ Performance and Acceptance Testing of Line-Concentrating Collectors and Solar Fields  
*Richtlinie zur dynamischen Leistungsmessung von linienfokussierenden Kollektoren und Solarfeldabnahme*

### **Abschlussarbeiten**

Die folgenden Abschlussarbeiten wurden im Rahmen des Projekts erstellt, auf Grund ihres Umfangs und von Sperrvermerken sind sie nicht beigefügt, können aber auf Anfrage zur Prüfung durch den Fördergeber eingesehen werden

- Gereon Feckler: Entwicklung und Validierung einer MATLAB-basierten Performance-Analyse von kraftwerksintegrierten Parabolrinnen-Kollektoren, Masterarbeit, FH Köln, 2013.
- Simon Schneider: Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Teststandes zur Messung des hemisphärischen Gesamtemissionsgrades von Absorberoberflächen für die Solartechnik, Masterarbeit, TU Dortmund, 2013.
- Timo Effertz: Weiterentwicklung eines Prüfstandes zur Messung des hemisphärischen Gesamtemissionsgrades zylindrischer Proben, Masterarbeit, FH Köln, 2014.
- Dmitri Artemjew: Analyse von thermischen Betriebsdaten von Parabolrinnen-Loops zur Charakterisierung ihrer Leistungsfähigkeit, Masterarbeit, Ruhr Universität Bochum, 2014.
- Andreas Plumpe: Design of a Test Rig and its Testing Methods for Rotation and Expansion Performing Assemblies in Parabolic Trough Collector Power Plants, Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2016
- Daniel Büchner: Analysis and Development of a Method for Determining the Performance of Concentrating Solar Collectors, Masterarbeit, INP University Grenoble, 2014.
- Joris Nettelstroth: Advancement of a dynamic method for determining the performance of linear concentrating solar collectors. Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2015.



- Martin Kaubitzsch: Untersuchung zur optischen Vermessung von Parabolrinnenspiegeln, Bachelorarbeit, FH München, 2014.

### **Sonstige Veröffentlichungen:**

- *sechs Poster zu den Arbeitspaketen des Projekts präsentiert beim 17. Kölner Sonnenkolloquium als Serie*  
**StaMeP: Entwicklung von standardisierten Messmethoden und Prüfständen für den Leistungsnachweis von Bauteilen solarthermischer Kraftwerke**
  - a. A. Hofer, A. Heimsath, K. Kramer, W. Platzer: Dynamische in-situ Kollektormessung
  - b. N. Janotte: Entwicklung von Richtlinien für Solarfeldabnahmetests
  - a. A. Heimsath, S. Meyen: Methodenverbesserung zur Messung des gerichteten Reflexionsgrads von Solarspiegeln
  - b. A. Georg, J. Pernpeintner: Messtechnik für optische Eigenschaften von Absorberschichten
  - c. S. Meiser, A. Heimsath: Standardisierung der Formtreuemessung von Parabolrinnenspiegeln – Vergleichsmessung Fh-ISE - DLR
  - a. C. Happich: Entwicklung eines Prüfstandes zur Qualifizierung von flexiblen Rohrverbindungen
- **Kurzbericht an die Deutsche CSP:**  
Verbundvorhaben StaMeP – Entwicklung von standardisierten Messmethoden und Prüfständen für den Leistungsnachweis von Bauteilen solarthermischer Kraftwerke,  
Projektkurzworstellung - Stand Mai 2014 -  
Autoren: A. Georg, A. Heimsath, A. Hofer, Chr. Happich, N. Janotte, E. Lüpfert, S. Meiser, St. Meyen , J. Pernpeintner, W. Platzer